Mª Inmaculada **López Ortiz** y Joaquín **Melgarejo Moreno** (Editores)



Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes

Excmo. Ayuntamiento de Orihuela
DIPUTACIÓN DE ALICANTE CICLO HÍDRICO
Universitat d'Alacant Universidad de Alicante
IUACA INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes

Editores:
Mª Inmaculada López Ortiz
Joaquín Melgarejo Moreno

© los autores, 2020
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-091-4

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

Coordinado por:

Patricia Fernández Aracil

ÍNDICE

PRESENTACIÓN: DE LAS ROGATIVAS A LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA, *Mª Inmaculada López Ortiz y Joaquín Melgarejo Moreno* 13

PRÓLOGO: CONVIVIR CON LA INUNDACIÓN, *Jorge Olcina Cantos* 21

BLOQUE I. FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y PLANIFICACIÓN TERRITORIAL 25

EFICACIA DE LAS MEDIDAS MULTI-ESCALA PARA REDUCIR EL POTENCIAL EROSIVO Y LOS ARRASTRES DE SEDIMENTOS EN CUENCAS SEMI-ÁRIDAS, *Luis G. Castillo Elsitdié, Juan T. García Bermejo, Juan Manuel García-Guerrero, José María Carrillo Sánchez, Francisco Javier Pérez De La Cruz* 27

PRECIPITACIONES INTENSAS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA. ANÁLISIS, SISTEMAS DE PREDICCIÓN Y PERSPECTIVAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO, *Jorge Tamayo Carmona, José Ángel Núñez Mora* 49

LIMITACIONES AL USO DEL SUELO EN ZONAS INUNDABLES: LEGISLACIÓN DE AGUAS, URBANÍSTICA Y DE PROTECCIÓN CIVIL, *Ángel Menéndez Rexach* ... 63

FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE LOS SISTEMAS DE ALERTA ANTE INUNDACIONES, *Gregorio Pascual Santamaría* 83

REVISIÓN DE LOS EVENTOS MÁXIMOS DIARIOS DE PRECIPITACIÓN EN EL DOMINIO CLIMÁTICO DE LA MARINA ALTA Y LA MARINA BAJA (ALICANTE), *Javier Valdés Abellán, Mauricio Úbeda Müller* 109

INUNDACIONES Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MEDITERRÁNEO, *María del Carmen Llasat Botija* 127

DANA 2019 Y ASPECTOS RELATIVOS A LA ESTIMACIÓN Y TRATAMIENTO DEL RIESGO ASOCIADO A INUNDACIONES, *Luis Altarejos García, Juan T. García Bermejo, José María Carrillo Sánchez, Juan Manuel* 143

IMPLANTACIÓN DEL SERVICIO SMART RIVER BASINS EN LA VEGA BAJA DEL SEGURA, Álvaro *Rogríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Xavier Llort, Simón José Pulido Leboeuf, Manuel Argamasilla Ruiz* 167

METEOROLOGÍA DE LAS INUNDACIONES MEDITERRÁNEAS, *Agustí Jansà Clar* 185

IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE PREDICCIÓN Y ALERTA DE INUNDACIONES EN GALICIA, *Jerónimo Puertas Agudo* 207

PLATAFORMAS DE ALERTA TEMPRANA Y DE GESTIÓN DE AVENIDAS. VISIÓN DESDE LA ADMINISTRACIÓN LOCAL, *Miguel Fernández Mejuto* 225

EL RIESGO DE INUNDACIÓN EN RAMBLAS Y BARRANCOS MEDITERRÁNEOS, *Ana Mª Camarasa-Belmonte* 239

ESTADO DE IMPLANTACIÓN DE LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN (P.G.R.I.) EN ESPAÑA, *Mónica Aparicio Martín, Juan Francisco Arrazola Herreros, Francisco J. Sánchez Martínez* 257

INUNDABILIDAD Y PLANIFICACIÓN URBANISTICA: HACIA EL ACLOPLAMIENTO DE LA CIUDAD A LA MATRIZ BIOFÍSICA DEL

TERRITORIO, *Pedro Górgolas Martín* 281

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA DE LOS AZARBES DEL BAJO SEGURA Y EL BAIX VINALOPÓ TRAS LAS INUNDACIONES DE SEPTIEMBRE DE 2019, *Gema Marco Dos Santos, Ignacio Meléndez Pastor, María Belén Almendro Candel, José Navarro Pedreño, Ignacio Gómez Lucas* 305

DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES: EVOLUCIÓN LEGISLATIVA Y RÉGIMEN VIGENTE, *Ángel Menéndez Rexach* 315

PARTICULARIDADES DE LA PERIURBANIZACIÓN EN EL LITORAL MEDITERRÁNEO COMO CONDICIONANTE DEL RIESGO DE INUNDABILIDAD, *Antonio Gallegos Reina* 325

LA CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD COMO BASE DE LOS PLANES DE EMERGENCIA: ANÁLISIS-DIAGNÓSTICO DEL TÉRMINO MUNICIPAL DE DAYA VIEJA (ALICANTE), *Antonio Oliva Cañizares, Alejandro Sainz-Pardo Trujillo y Esther Sánchez Almodóvar* 333

VULNERABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO TERRITORIAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA, PROVINCIA DEL AZUAY (ECUADOR), *Johnny Mena Iza, Yessenia Alquinga Herrera, Teresa Palacios Cabrera* 347

PREDICCIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE TORMENTAS DE DISEÑO Y CAMBIOS EN EL TERRITORIO EN CINCO CUENCAS HIDROLÓGICAS (SE ESPAÑA), *Antonio Jódar Abellán, Javier Valdés Abellán, Concepción Pla, Miguel Ángel Pardo Picazo, Pedro Jiménez Guerrero, Daniel Prats* 357

ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE CAUDALES MÁXIMOS DE AVENIDA EN EL TRAMO TORO-ZAMORA: POSIBLE INCIDENCIA DE LA SINUOSIDAD DEL RÍO DUERO EN LA LAMINACIÓN DE LAS PUNTAS DE CRECIDA, *José Fernando Muñoz Guayanay, Carolina Guardiola Albert y Andrés Díez Herrero* 367

EFECTOS DE LA DANA DE SEPTIEMBRE DE 2019 SOBRE LA SALINIDAD DE LOS SUELOS Y LAS AGUAS EN LA ZONA DE CARRIZALES (ELCHE-ALICANTE), *José Miguel de Paz, Alberto Lamberti, Fernando Visconti* 377

PREVENCIÓN FRENTE A PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS EN EL AGUA DE CONSUMO HUMANO DURANTE INUNDACIONES, *Arturo Albaladejo Ruiz, María Yolanda Pérez Bragado* 389

ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU IMPACTO EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL EMBALSE DE GUADALEST, *Teresa Palacios Cabrera, Javier Valdés Abellan, Antonio Jódar Abellán, Rafael Alulema* . 399

RECIENTES EPISODIOS DE LLUVIAS E INUNDACIONES EN LA DEPRESIÓN PRELITORAL MURCIANA, *Encarnación Gil-Meseguer, Miguel Borja Bernabé-Crespo, José María Gómez-Espín* 409

RECIENTES EPISODIOS DE LLUVIAS E INUNDACIONES EN EL LITORAL DE LA REGIÓN DE MURCIA, *Miguel Borja Bernabé-Crespo, Encarnación Gil- Meseguer, José María Gómez-Espín* 419

SISTEMA DE ALERTA ANTE INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MURCIA, *Pedro Daniel Martíenz Solano, Lorena Martínez Chenoll, Dorota Nowicz* 431

CONFLICTOS ENTRE DESARROLLO URBANO E INUNDABILIDAD EN LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA, *Alejandro L. Grindlay Moreno, F. Emilio, Molero Melgarejo, Jorge Hernández Marín* 441

VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL SEGURA DURANTE 1951-2018, *Amar-Halifa-Marín, Miguel Ángel Torres Vázquez, Juan Sndrés García-Valero, Antonio Jesús Castillo Cascales, Juan Esteban Palenzuela Cruz*..... 451

LOS BARRANCOS DE LA SIERRA DE ORIHUELA EN LAS INUNDACIONES DEL BAJO SEGURA: EL CASO DE LA RAMBLA DE BONANZA, *Estela García Botella, Antonio Prieto Cerdán, Juan Antonio Marco Molina, Pablo Giménez Font, Ascensión Padilla Blanco* 465

INUNDACIÓN POR TSUNAMIS. SIMULACIONES NUMÉRICAS A MUY ALTA RESOLUCIÓN, Carlos Sánchez Linares, Alejandro González del Pino, Jorge Macías Sánchez 477

LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ÁMBITOS URBANOS. UN ELEMENTO A TENER EN CUENTA PARA LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO, *Luis Miguel García Lozano* 489

BLOQUE II. MEDIDAS DE MITIGACIÓN E INFRAESTRUCTURAS 499

ORDENACIÓN DEL TERRITORIO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES: PROPUESTAS, *Jorge Olcina Cantos* 501

EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA: RETOS FUTUROS, *Teodoro Estrela Monreal*..... 517

LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES EN ÁREAS URBANAS: DE RIESGO A RECURSO, *María Hernández Hernández, David Sauri Pujol, Álvaro-Francisco Morote Seguido*..... 531

CRECIDAS, INUNDACIONES Y RESILIENCIA: RESTAURACIÓN FLUVIAL CONTRA LOS FALSOS MITOS, *Alfredo Ollero Ojeda* 549

EXPERIENCIAS Y PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA URBANA FRENTE A INUNDACIONES, *Mª Elena García de Consuegra Priego* 569

ESTADO DE RIESGO DE LA VEGA BAJA DEL RÍO SEGURA FRENTE A INUNDACIONES. NECESIDAD DE REALIZAR UN PLAN DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, *José Vicente Benadero García-Morato, Pedro Ignacio Muguruza Oxinaga, Jordi Marín Abdilla* 591

INCREMENTO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO Y POSIBLE NO ESTACIONARIEDAD DE FENÓMENOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS RELATIVOS A CRECIDAS E INUNDACIONES, *Francisco Cabezas Calvo-Rubio* 611

EL EFECTO LAMINADOR DE LOS EMBALSES DURANTE LAS AVENIDAS, *Luis Garrote de Marcos, Paola Bianucci* 629

LAS POLÍTICAS DE GESTIÓN DE RIESGOS Y DESASTRES DE DISTINTOS ORGANISMOS MULTILATERALES Y SU REPERCUSIÓN SOBRE EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN FRENTE A INUNDACIONES, *Ignacio Escuder Bueno*..... 647

LA ADAPTACIÓN COMO HERRAMIENTA CLAVE PARA DISMINUIR LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN, *Francisco Javier Sánchez Martínez, Mónica Aparicio Martín, Juan Francisco Arrazola Herreros*..... 659

ESTUDIO DE IMPACTO DE TSUNAMIS EN LAS COSTAS ESPAÑOLAS, *Miguel Llorente Isidro, Marta Fernández-Hernández, Alejandro González del Pino, Julián García-Mayordomo, Juan Vicente Cantavella Nadal, Jorge Macías Sánchez, Juan-Tomás Vázquez, Carlos Sánchez Linares*, *Carlos Paredes Bartolomé, Ricardo León Buendía* 684

ENFOQUE PROBABILÍSTICO PARA LA SEGURIDAD HIDROLÓGICA DE INFRAESTRUCTURAS, *Alvaro Sordo-Ward, Iván Gabriel-Martín, Luis Garrote de Marcos* 701

CONSIDERACIONES SOBRE LA PELIGROSIDAD EN ZONAS URBANAS FRENTE A NUNDACIONES MEDIANTE SIMULACIONES A PARTIR DE MODELOS 2D, *José María Carrillo Sánchez, Luis G. Castillo Elsitdié, Juan T. García Bermejo, Juan Manuel García-Guerrero, Luis Altarejos García, Francisco Javier Pérez De La Cruz* 723

LA GESTIÓN EXTRAORDINARIA DE GRANDES INFRAESTRUCTURAS DURANTE LA DANA DE SEPTIEMBRE DE 2019: EL AZUD DE OJÓS, *Carlos Marco Ayala* 743

NUEVOS USOS EN EL NUEVO CAUCE DEL TURIA COMPATIBLES CON SU DEFENSA DE VALENCIA FRENTE A INUNDACIONES, *Francisco J. Vallés-Morán, Beatriz Nácher Rodríguez* 759

SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE. TIPOS Y OBJETIVOS, *Héctor Fernández Rodríguez, Arturo Trapote Jaume, Miguel Fernández Mejuto* 773

INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN EL DISEÑO DE COLECTORES Y EN EL RIESGO DE INUNDACIÓN, *Arturo Trapote Jaume* 787

RESEARCH ON URBAN WATERLOGGING IN CHINA, *Yang Yang* 797

GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA, *José Alberto Redondo Orts, M. Inmaculada López Ortiz* 805

EL PROBLEMA DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL EN EL NÚCLEO URBANO DE ASPE (ALICANTE), *Esther Sánchez Almodóvar, Javier Martí Talavera* *817*

AS OBRAS DE PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES NO MARCO DA ECONOMIA CIRCULAR, *Felipe da Silva Claudino* 829

DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA HIDROLÓGICA. DESARROLLO DE UN MODELO METODOLÓGICO PARA LA GESTIÓN RESILIENTE DE LAS INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS URBANAS, *Ramón Egea Pérez, Francisco José Navarro González* 841

EFECTO SOBRE LAS INUNDACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN LA RAMBLA DEL ALBUJÓN, *Adrián López Ballesteros, Javier Senent Aparicio, Julio Pérez Sánchez, Patricia Jimeno Sáez* 855

METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN DE REDES DE DRENAJE MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL HIDRÁULICO, *Leonardo Bayas-Jiménez, F. Javier Martínez-Solano, Pedro L. Iglesias-Rey* 863

SOSTENIBILIDAD COMO MEDIDA DE MITIGACIÓN DE INUNDACIONES: UNA BREVE REFLEXIÓN, *Francine Cansi, Paulo Márcio Cruz, Liton Lannes Pilau Sobrinho* 873

LA RAMBLA DE ABANILLA-BENFERRI COMO PARADIGMA PARA EL ESTUDIO DEL CONOCIMIENTO TRADICIONAL RELATIVO AL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE AVENIDA, *Juan Antonio Marco Molina, Pablo Giménez Font, Ascensión Padilla Blanco, Estela García Botella, Antonio Prieto Cerdán* 881

LA RECUPERACIÓN DE COSTES Y LA FINANCIACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE DAÑOS DE INUNDACIONES, *Marcos García-López, Borja Montaño, Joaquín Melgarejo* 897

SISTEMA DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS Y ELEMENTOS FLOTANTES PROCEDENTES DE ALIVIOS DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO EN LA CIUDAD DE ALICANTE, *Luis Gabino Cutillas Lozano, Miguel Rodriguez Mateos* 907

SOLUCIONES A LAS INUNDACIONES DE LA CALA DE FINESTRAT, *Miguel Angel Pérez Pascual, Pablo Alemany Sánchez* 917

BLOQUE III. EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA, AMBIENTAL Y JURÍDICA 931

PLANIFICACIÓN SECTORIAL Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES: AVANCES EN LA ESTRATEGIA DE INTEGRACIÓN TÉCNICO-JURÍDICA, *Asensio Navarro Ortega* 933

SEGURO DE INUNDACIÓN EN ESPAÑA: EL SEGURO DE RIESGOS EXTRAORDINARIOS, *Francisco Espejo Gil* 957

LA COMUNICACIÓN, UN PILAR FUNDAMENTAL EN LA GESTIÓN DE RIESGOS NATURALES, *Fermín Crespo Rodríguez* 973

VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN A LAS INUNDACIONES EN ESPACIOS TURÍSTICOS DEL LITORAL MEDITERRÁNEO, *Anna Ribas Palom* 983

LA RESPONSABILIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN EN SUPUESTOS DE DAÑOS ORIGINADOS POR INUNDACIONES: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO, *Jesús Conde Antequera* *1001*

EVALUACIÓN DE IMPACTO SOCIAL COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE POR INUNDACIÓN, *Antonio Aledo, Pablo Aznar-Crespo, Guadalupe Ortiz* 1023

LAS NUEVA ESTRATEGIA DEL DERECHO EN LA REGULACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RIESGOS DE INUNDACIONES, *José Esteve Pardo* 1041

METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE COSTE BENEFICIO PARA OBRAS ESTRUCTURALES EN LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN (P.G.R.I.), *Francisco J. Sánchez Martínez, Juan Antonio Hernando Cobeña, Mónica Aparicio Martín, Silvia Cordero Rubio, Miguel Aldea Pozas, Elena Martínez Bravo* 1049

ANÁLISIS DE LA PERCEPCIÓN SOCIAL PARA LA GESTIÓN Y COMUNICACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES, *Juan Antonio García Martín, María Amérigo Cuervo-Arango, José María Bodoque del Pozo, Andrés Díez-Herrero, Raquel Pérez-López, Fernando Talayero Sebastián* 1069

¿ES LA NORMATIVA ESPAÑOLA UNA HERRAMIENTA ADECUADA PARA LA PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS NATURALES?, *Jesús Garrido Manrique* 1087

EL FORO FUERZA VEGA BAJA: NECESIDADES Y POSIBILIDADES DE FINANCIACIÓN, *Armando Ortuño Padilla, Santiago Folgueral Moreno, Fabio Amorós Fructuoso* 1107

METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE LOS DAÑOS CAUSADOS POR AVENIDAS E INUNDACIONES, *Alberto del Villar García* 1129

LA FORMACIÓN Y PERCEPCIÓN SOBRE EL RIESGO DE INUNDACIÓN. UNA EXPLORACIÓN A PARTIR DE LAS REPRENSENTACIONES SOCIALES DEL FUTURO PROFESORADO DE EDUCACIÓN PRIMARIA, *Álvaro-Francisco Morote,*

María Hernández 1143

EL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO Y LA EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN, *Patricia Fernández Aracil* *1153*

ECONOMIA CIRCULAR: A REUTILIZAÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS NO SETOR URBANÍSTICO COMO BENEFÍCIO DO TURISMO NACIONAL, *Joline Picinin Cervi* *1163*

LECCIONES DEL ETNOCONOCIMIENTO INDÍGENA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES SÚBITAS. EL CASO DE LA COMUNIDAD INDÍGENA NASA (CAUCA-COLOMBIA), *Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur, Sandra Ricart Casadevall* 1171

ENSAYO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN SOCIAL DE LA AMENAZA: INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO JUQUERI, SÃO PAULO – BRASIL, *Rodolfo Baesso Moura, Fernando Rocha Nogueira, Rafael Costa e Silva, Samia Nascimento Sulaiman, Lucas Rangel Eduardo Silva, João Henrique José Vieira* 1181

PROGRAMA DE EDUCACIÓN INFANTIL EN EL RIESGO DE INUNDACIONES 'VENERO CLARO-AGUA' (ÁVILA), *Andrés Díez Herrero, Mario Hernández Ruiz, Pablo Díez Marcelo, Carlos Carrera Torres* 1191

MEJORA DE LA PERCEPCIÓN Y CONOCIMIENTO INFANTIL SOBRE EL RIESGO DE INUNDACIONES: PROGRAMA 'VENERO CLARO-AGUA' (ÁVILA), *Mario Hernández Ruiz, Miguel García-Pozuelo Ben, Andrés Díez Herrero, Carlos Carrera Torres* 1201

PRIMERA APROXIMACIÓN AL REGISTRO DE AVENIDAS E INUNDACIONES HISTÓRICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA, *Andrés Díez Herrero* 1211

MANIFESTACIONES CULTURALES POPULARES EN TORNO A LAS AVENIDAS E INUNDACIONES EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA, *Andrés Díez Herrero* 1221

MEDIDAS Y ACCIONES PREVENTIVAS CONTRA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL SEGURA: UNA PERSPECTIVA HISTÓRICO-JURÍDICA, *Francisco José Abellán Contreras* 1231

LAS NARRATIVAS DE LOS PLANES GUBERNAMENTALES COMO UNA ESTRATEGIA PARA LA IMPOSICIÓN DE UN NUEVO CICLO DE EXPLORACIÓN EN LA REGIÓN AMAZÓNICA: EL CASO DE LAS HIDROELÉCTRICAS EN BRASIL, *Pedro Abib Hecktheuer, Maria Cláudia da Silva Antunes de Souza* 1241

ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE DAÑOS POTENCIALES SOBRE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE POR INUNDACIONES EN EL TRAMO TORO-ZAMORA, *Lei Dai, Manuel Romana García, Andrés Díez Herrero* 1257

EL GÉNERO COMO FACTOR DE FORMULACIÓN PARA LA CREACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTALES, *Marcus Alexsander Dexheimer, Mably Rosalina Fernandes* 1267

CARTOGRAFÍA DE RIESGOS DE INUNDACIÓN Y PLANIFICACIÓN. PROPUESTAS PARA BRASIL DESDE LA EXPERIENCIA ESPAÑOLA, *Andrés Molina Giménez, Ximena Cardozo Ferreira* 1275

EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE LA DIMENSIÓN SOCIAL Y LA PARTICIPACIÓN PÚBLICA EN LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN: ¿CAMBIO O CONTINUIDAD PARADIGMÁTICA?, *Ángela Olcina-Sala, Guadalupe Ortiz, Pablo Aznar-Crespo* 1283

RESPONSABILIDAD ADMINISTRATIVA DE LOS ENTES LOCALES POR FALTA DE MANTENIMIENTO O INDADECUACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE SANEAMIENTO Y ALCANTARILLADO, *Belén Burgos Garrido* 1293

DE LA ROGATIVA POR EL AGUA A LA INTERVENCIÓN PREVENTIVA POR INUNDACIÓN. LA HUELLA DEL DERECHO EN LA FACHADA MEDITERRÁNEA PENINSULAR (I), *Mª Magdalena Martínez Almira* 1305

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS ESPAÑOLAS SOBRE INUNDACIONES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL: ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA *WEB OF SCIENCE*, *Andrés Díez Herrero, Julio Garrote Revilla* 1321

PRESENTACIÓN: DE LAS ROGATIVAS A LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA

Mª Inmaculada López Ortiz y Joaquín Melgarejo Moreno
Universidad de Alicante

Previo al conocimiento científico y a los distintos planes y proyectos de control y mitigación de las inundaciones, la acción de las sociedades se situaba en un plano casi mítico, la impotencia frente a determinados fenómenos extremos era difícilmente comprensible y se recurrió a la protección espiritual. Entre las noticias de origen religioso tienen especial interés, las rogativas y otros actos de piedad religiosa, con los que se intentaba combatir las adversidades atmosféricas. Las rogativas eran ceremonias que hacían referencia a la necesidad de lluvias (*pro pluvia*) o para que se serenaran las lluvias (*pro serenitate*) y las "Acciones de Gracias", para dar las gracias por haber llovido o por haber serenado la lluvia. Parece que estas prácticas se remontan al siglo V, siendo ya frecuentes en la Edad Media (Ferreras, 2004). Es sobre todo en los siglos XVI y XVII, cuando alcanzan su mayor auge, motivadas por una serie de grandes calamidades meteorológicas, no es de extrañar que una sociedad abrumada reiteradamente por toda clase de adversidades como: hambres, sequías, inundaciones, plagas de langosta y pestes, se recurriera a la intervención divina, en busca de ayuda o de fuerzas para sobrellevar tanta desgracia. Los recursos espirituales se convertían en la última esperanza de una población intensamente dependiente de su medio. En Orihuela durante la segunda mitad del siglo XVIII las rogativas son la representación más visible, de este tipo de rituales piadosos cuya función es solicitar a la divinidad su favor ante el riesgo de sufrir alguna clase de calamidad (Cremades, 2018). Las rogativas no han desaparecido de nuestro acervo cultural, siguen teniendo los mismos objetivos que las de época preindustrial, recientemente en los templos aún se hacen rogativas por la lluvia. En 2006 el obispo de la Diócesis de Cartagena, Juan Antonio Reig Pla, promovió una misa rogativa a propuesta del Sindicato de Regantes del trasvase Tajo-Segura. En 2017 fueron convocadas rogativas por el Cardenal Antonio Cañizares, Arzobispo de Valencia, ante la grave sequía que se estaba padeciendo, invitó a los sacerdotes, diáconos, religiosos y laicos de su diócesis a orar a Dios por el *"Don de la lluvia"*. Lo mismo hicieron Casimiro López, obispo de la Diócesis de Segorbe-Castellón, José Manuel Lorca Planes, obispo de la Diócesis de Cartagena y Fidel Herráez Vergas, arzobispo de Burgos. Casimiro López recordó en su misiva la oración colecta del Misal Romano "para pedir la lluvia" (*Ad petendam pluvi*am). En 2019, el obispo de Huelva, José Vilaplana Blasco, en nota pública invita "ante la situación de prolongada sequía que padece nuestra provincia, y atentos a la preocupación de agricultores y ganaderos (…) se ofrezcan oraciones para pedir al Señor que nos conceda la lluvia tan necesaria para los campos y manantiales y se sugiere que en la oración de los fieles se añada una especial petición en este sentido, y que, cuando lo permitan las normas litúrgicas, se celebre la misa *ad petendam pluviam*, que se recoge en el misal romano".

La primera red oficial de Observatorios Meteorológicos que se estableció en España se formó en 1860. Olayo Díaz Giménez, catedrático de Física y Química, fue el director del Observatorio Meteorológico de Murcia, que se había creado junto a otros 21. Díaz Giménez da cuenta de forma pormenorizada de los efectos de la riada de Santa Teresa, del 14 al 15 de octubre de 1879: "La huerta murciana quedó inundada en sus tres cuartas partes y el número de víctimas se elevó a más de 800 personas, 13.769 animales; destruidas 2.641 casas, así como 1.407 chozas y arruinadas 997 casas y 220 chozas. Al río Guadalentín le estimaron un caudal de 1.700 m^3/s aguas abajo de Puentes y al Segura alrededor de 2.500 m^3/s; estimándose las pérdidas en aproximadamente 8.000.000 de pesetas". En efecto, la confluencia de las aguas del río Guadalentín (1.510 m^3/s, a su paso por Lorca y las del Segura(1.890 m^3/s, a su paso por Murcia) provocaron un aterrador balance: se contabilizaron 777 muertos, más de siete mil familias de huertanos quedaron totalmente en la miseria, las viviendas completamente destruidas , entre casas y

barracas, ascendieron a casi seis mil, a las que se sumaron unas tres mil que quedaron en estado ruinoso, algunas aldeas desaparecieron y los daños fueron tasados en más de 15.000.000 de pesetas, de los que 11, correspondieron a la provincia de Murcia. La magnitud de la catástrofe provocó una gran conmoción en todos el Mundo. Auspiciada por la prensa, se inició una campaña internacional pro-damnificados, que recaudó más de seis millones de pesetas, las ayudas vinieron en su mayor parte de Francia, pero también de otros lugares como Austria, Colombia, Argentina y Bélgica, entre otros países (Melgarejo, 2001). La inundación de Santa Teresa demostró la insuficiencia de las obras hasta ese momento realizadas, suscitó la conmoción social necesaria para promover la reflexión y mentalizó a la sociedad para poner fin a este tipo de desastres. Sin embargo, las medidas tomadas no debieron ser lo suficiente eficientes, ya que en 1884 volvió a producirse una nueva inundación que arrasó las vegas del Segura, esta vez sí se convocó un Congreso impulsado por la prensa, este se celebró en Murcia en marzo de 1885. El presidente del Consejo de Ministros, Antonio Cánovas del Castillo, ordenó crear una Comisión de ingenieros que estudiara las causas de las grandes inundaciones en las provincias de Murcia, Alicante y Almería, el ingeniero Ramón García Hernández fue nombrado presidente de esa Comisión. La Comisión presentó su informe en agosto de 1886, proponiendo en él un plan completo de salvación. La Memoria se denominó Proyecto de Obras de Defensa contra las Inundaciones en el valle del Segura. Fue el primer Plan global de defensa contra las avenidas que se hizo en España. Fue una propuesta bien fundamentada teórica y empíricamente, en la que se aportaron soluciones concretas, se apostó por la viabilidad de las propuestas, sólo se proyectaron aquellas obras que los conocimientos técnicos y la rentabilidad, humana y económica, permitían llevar a cabo en ese momento; implícitamente realizaron un análisis de coste beneficio (Melgarejo, 2001). Tres fueron los objetivos que se marcaron en la Memoria: 1º evitar directamente los desbordamientos, mediante la construcción de diques longitudinales; 2º modificar el régimen de las aguas, rebajando el nivel máximo, construyendo para ello depósitos, canales de derivación, repoblando montes, realizando zanjas longitudinales etc.; y 3º paliar los efectos negativos de las inundaciones, utilizando métodos indirectos, que no las evitaban, pero contribuían a hacer más llevaderos los resultados, tales como seguros, reglamentación de las zonas inundables, selección de cultivos etc. Sorprende la vigencia y modernidad de estos postulados que tras más de 130 años sigan estando, en buena medida en la base de actuación de la política contra las inundaciones. El Proyecto de Ramón García de 1886, cierra un tiempo de oscurantismo y abre un periodo basado en los avances del conocimiento científico, puesto al servicio de la corrección y mitigación de las inundaciones. Las actuaciones previstas en el Plan de 1886, se fueron ejecutando paulatinamente y fueron incorporadas al Plan de Obras Hidráulicas de 1902, Plan Gasset, e incluidas en el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933, dirigido por Manuel Lorenzo Pardo. La inundación de Santa Teresa de 1879, tuvo como resultado un Congreso que alimento un Plan innovador y de largo recorrido, del que todavía se están recogiendo sus frutos. La Inundación de Santa María de 12 de septiembre de 2019, está en la base del Congreso Nacional sobre Inundaciones, celebrado en Orihuela los días 10 y 11 de 2020, un año después de la de la catastrófica Inundación de Santa María, esperamos que las excelentes ponencias y comunicaciones presentadas arrojen luz y se materialicen sus propuestas en un Nuevo Plan contra las Inundaciones, que recoja todo el conocimiento y amplitud de miras que requiere un fenómeno como el de la inundaciones y sus efectos sobre las personas, bienes, territorio y medio natural.

Tras la riada de 1946, llamada la Bendita, en alusión a una pancarta que decía *"Bendita riada que nos ha traído a nuestro Caudillo"*, que asoló las vegas de Segura, se construyeron los embalses de Cenajo, el mayor de la cuenca del Segura, y Camarillas, ambos se hicieron con una doble finalidad defensa y riego[1].

[1] En la huerta quedaron afectadas por los desbordamientos 200.000 tahúllas, de las que 85.000 correspondían a Orihuela. Los pueblos alicantinos de Dolores, Rafal y San Fulgencio fueron evacuados ante el peligro de ser bloqueados por las aguas.

La riada del 19 de octubre de 1973 arrasó todo el valle del Guadalentín. La inundación se dejó sentir predominantemente en Puerto Lumbreras, con 83 muertos y en Lorca con 13, donde el desbordamiento de la rambla de Nogalte con un caudal de 2.000 m^3/s y cuantiosos daños materiales[2]. El caudal aforado en la rambla, en Puerto Lumbreras, presentó un máximo instantáneo de 1.161 m^3/s y 813 m/s (el 41%) de arrastres sólidos, lo que da 1.974 m/s de colada fangosa. En el Guadalentín el máximo instantáneo fue de 2.050 m^3/s. El caudal específico fue de 8.35 $m^3/s/km^2$. El Guadalentín inundó las vegas de Lorca y sus aguas sumadas, una vez más, a las del Segura inundaron buena parte de la huerta de Murcia y de la Vega Baja.

Como consecuencia se redacta el Plan de Defensa contra Avenidas de 1977, del cual no se lleva a cabo ninguna obra hasta diez años después. Hubo de ocurrir la inundación de 1986 para que se promulgara el Real decreto-Ley 4/87 de 13 de noviembre donde se disponían los recursos presupuestarios necesarios, este Decreto marcó un hito en la lucha contra avenidas en la cuenca del Segura; la avenida extraordinaria de noviembre de 1987, con lluvias de hasta 500 mm en el Campo de Cartagena y 400 mm en la Vega Baja, determinó que el Consejo de Ministros dictara la Ley 13 noviembre de 1987, donde se marcaba que las obras debían finalizar en 1992. Para la redacción del Plan se tuvieron en cuenta las inundaciones que se habían producido tras la entrada en funcionamiento de los embalses de Cenajo y Camarillas en 1960, se estudiaron con detenimiento las de 1946, 1947[3], 1948[4], 1949[5] y 1973. Las soluciones propuestas fueron similares a las del Plan de 1886 de Ramón García y Luis Gaztelu: obras longitudinales, embalses, correcciones hidrológicas y repoblaciones forestales. El presupuesto total con expropiaciones y sin incluir la repoblación forestal ascendió a 5.415.492.000 pesetas. La estimación del coste de las acciones correctoras sobre la erosión de la cuenca, repoblación, conservación del suelo, pastizales, etc.) era de 11.827.030.000 pesetas, es decir, más del doble que para las obras de defensa (Bautista Martí, J. 1989).

---

[2] Sólo se puede hablar de inundación catastrófica cuando el sistema humano de uso del curso fluvial es incapaz de administrar la circulación de las aguas altas, y éstas, por tanto, perjudican los asentamientos. La inundación de Puerto Lumbreras de 1973, dependió esencialmente de diversos errores del sistema humano (Calvo, 1989).

[3] El 28 de septiembre de 1947, se produjo la Avenida de Santomera, con unas espectaculares crecidas en Ias ramblas de la Vega Media y Baja, debido a una lluvia torrencial, que ocasionaron inundaciones en la huerta, desde Monteagudo hasta Guardamar, al unirse las aguas de las ramblas con la crecida que llevaba el río Segura. Quedaron inundadas zonas de Alguazas, Molina y Fortuna. El desbordamiento en la rambla de Churra ocasionó un muerto y la destrucción de varias casas. En Santomera la inundación resultó catastrófica ya que arraso más de 100 casas y ocasionó 12 víctimas al desbordarse la rambla Salada, quedando sin hogar más de dos mil personas. En el área de Orihuela, la rambla de Abanilla dejó inundadas zonas de huerta y anegó el pueblo de Benferri, cuyo cementerio quedó asolado por el ímpetu de las aguas. La ciudad de Orihuela y su huerta quedaron inundadas por el desbordamiento del Segura. La catedral de dicha ciudad, llegó a tener cerca de un metro de agua en su interior. Otras localidades de la Vega Baja también quedaron inundadas, casos de Catral, Dolores, Almoradí, y Rojales.

[4] El 20 de octubre de 1948, en el pantano de Puentes las aguas vertieron por encima de la coronación de la presa, inundando la huerta de Lorca y núcleos urbanos de la ciudad. La huerta lorquina quedó anegada en una extensión de 15.000 hectáreas. El desbordamiento en la rambla de Nogalte ocasionó la inundación de Puerto Lumbreras y Sangonera. Dentro de la zona del río Segura, en la localidad de Cieza se desbordaron las ramblas Agua Amarga y Cárcabo, anegando parte de la huerta. En Archena también quedó inundada su huerta. En Ceutí, la rambla de Huete se desbordó e inundó medio pueblo y su huerta, así como en Lorquí. La crecida del río Mula anegó las localidades de Alguazas y, en su unión con el Segura, la huerta de Molina. El río Segura se desbordó en Murcia capital y varias calles del barrio del Carmen quedaron inundadas. El día 22 empezó a desbordarse el río en Orihuela, quedando inundada en su totalidad y alcanzando las aguas alturas de dos metros. También sufrieron los efectos de la inundación las localidades de Almoradí, Dolores, Rafal y la totalidad de los términos municipales de Bigastro, Jacarilla, Benejúzar y San Fulgencio, calculándose en unas 105.000 las tahúllas anegadas. Así mismoo, el día 21 quedó inundada Cartagena al desbordarse la rambla de Benipila, alcanzando las aguas alturas superiores al metro y medio.

[5] El 20 de octubre de 1949, otra “gota fría” hizo que el río Guadalentín inundara la huerta de Lorca y núcleos urbanos de la ciudad. La huerta lorquina quedó anegada en una extensión de 15.000 hectáreas, afectando también al río en Orihuela, quedando inundada en su totalidad y alcanzando las aguas alturas de dos metros. También sufrieron los efectos de la inundación las localidades de Almoradí, Dolores, Rafal y la totalidad de los términos municipales de Bigastro, Jacarilla, Benejúzar y San Fulgencio

La gestión de las inundaciones en España tuvo un punto de inflexión con las inundaciones que ocurrieron en los años 1982 en el Júcar y 1983 en el País Vasco. La rotura de la presa de Tous, en el río Júcar, tuvo lugar en octubre de 1982 afectó a unas 200.000 personas y causó 8 víctimas; los daños materiales se estimaron en unos 1.500 millones de euros, del año 2000. En agosto de 1983, más de un centenar de localidades del País Vasco fueron declaradas zona catastrófica, después de que unas incesantes lluvias provocasen inundaciones generalizadas; el número de víctimas fue superior a 30 y los daños materiales se estimaron en 1.200 millones de euros. Consecuencia de las inundaciones anteriores se desarrolló Programa SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica), cuyo objeto inicial era disponer de un sistema de previsión y gestión de crecidas en los Organismos de cuenca (MIMAM, 2000).

Del 11 al 14 de mayo de 1989 se celebró en Alicante y Murcia el simposio, bajo el calificativo de Reunión Científica Internacional "Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo" coordinado por los catedráticos Antonio Gil Olcina y Alfredo Morales Gil, de esta Reunión salieron importantes trabajos y conclusiones que han marcado la gestión de las inundaciones, durante al menos los veinte años siguientes.

Las últimas actuaciones importantes, realizadas como consecuencia de las intensas lluvias de 1987[6], fueron elaboradas por la Confederación Hidrográfica del Segura, al amparo de su Plan de Defensa contra Avenidas del río Segura que, desarrollando los estudios previos realizados en 1977, concluyó con la ejecución de 23 actuaciones (13 presas, encauzamientos desde la Contraparada, Murcia, a Guardamar, Alicante, y algún canal de descarga). Así pues, el plan se fundamenta en que dada la imposibilidad de realizar un encauzamiento para un caudal superior al admisible (400 m^3/s) en diversas poblaciones, se adopta el criterio de realizar un canal para dicho caudal y presas de laminación en los diversos afluentes del río, para tratar de conseguir que la avenida no supere dicho valor. El coste estimado de las obras en 1.995 era de 300 millones de euros. Las obras del Plan de defensas contra avenidas concluyeron en 2.001 (Estudio Generalitat Valenciana, 2020).

Otra "gota fría" trágica se produciría dos años después, en 1989 con precipitaciones excepcionales que se registraron por toda la cuenca durante varios días e hicieron que el Segura se desbordara provocando inundaciones generales y cuantiosos daños.

En 1997, la ciudad de Alicante sufrió la peor "gota fría" de su historia, con cinco muertos. A finales del mes de septiembre, una tromba de agua generada por una lluvia de 200 litros por metro cuadrado en apenas dos horas inundó el casco urbano. Toda el agua que se acumuló en los barrancos en el perímetro metropolitano acabó dentro de Alicante. A partir de esta tragedia, el Consell aprobó canalizar todos los barrancos, con una inversión de 17.000 millones de pesetas.

La riada de Santa María de 12 de septiembre de 2019[7]. Las lluvias torrenciales provocadas por la Depresión Aislada en Niveles Altos de la Atmósfera (DANA) han dejado registros históricos, según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). En 48 horas recogieron en Beniarrés (Alicante) 452,4 litros por metro cuadrado; en Orihuela (Alicante), 425,4 litros por m^2; y en Onteniente (Valencia), 339,2 litros

[6] https://www.chsegura.es/static/pdefensa/Avenidas-de-la-Cuenca-del-Segura.-Tomo-01-COMPLETO.pdf

[7] Inundación de Santa María, del 10 al 14 de septiembre de 2019: este episodio, de magnitudes extraordinarias, ha dado lugar al registro de 6 récords de precipitación en 24 horas del sureste peninsular, registrando 521 litros por metro cuadrado en Orihuela (Alicante) entre el 10 y el 14 de septiembre, concretamente se alcanzaron 497,6 litros en 48 horas. Este fenómeno ha resultado excepcional hasta el punto de no existir precedentes similares en, al menos, 100 años en la Vega Baja del Segura. Igual que había sucedido en diciembre de 2016, las lluvias de septiembre de 2019 se concentraron en los tramos finales de la cuenca del río Segura, es decir, aguas abajo de los sistemas de laminación de avenidas más relevantes, lo que dio lugar a inundaciones generalizadas en la Vega Baja del Segura

por m^2. Baste indicar que de las 127 estaciones pluviométricas controladas por la CHS en 28 de ellas (25% de las estaciones) el valor diario del día 12 de septiembre superó los 150 mm con un máximo en Orihuela de 346 mm, en 38 (~30%) entre 100 y 150 mm y en 38 más (~ otro 30%) entre 50 y 100 mm. En total, en el pluviómetro de Orihuela de la Confederación Hidrográfica del Segura se acumularon 521,6 litros, en Jacarilla 404,6, en Crevillent 323,2 y en el embalse de la Pedrera, 321 (Biener y Prieto, 2019).

En resumen, la comarca de la Vega Baja, debido a su configuración de planicie, la inexistencia de vías de alivio para los caudales derivados desde la Rambla de Abanilla y la insuficiencia de infraestructuras para la evacuación de las aguas procedentes de la sierra de Crevillente, así como, la "ajustada" capacidad del nuevo cauce del río Segura, provoca que sea un área vulnerable a inundaciones incluso por las lluvias caídas sobre el mismo territorio en episodios de bajo periodo de retorno. La solución a este problema no es únicamente de orden técnico, pese a su complejidad en este campo, sino también afecta a cuestiones sociales, medioambientales, urbanísticas, económicas y administrativas. Los daños de la avenida de septiembre están por encima de los mil millones de euros entre reclamaciones al Consorcio de Compensación de Seguros, pérdidas en producción agrícola actual y futura, daños a infraestructuras, daños a la industria, pérdidas de lucro cesante, pérdidas de salario y productividad que afectaron especialmente a la Vega Baja del Segura y al Campo de Cartagena.

La inundación de Santa María y sus repercusiones sociales, económicas, territoriales y ambientales están en la base del Congreso Nacional de Inundaciones que se celebró en Orihuela los días 10 y 11 de septiembre de 2020. Sirvan las reflexiones, conocimientos y proyectos expuestos para que mejoren en nuestro país la gestión de las inundaciones de una forma integral, de acuerdo con los efectos del cambio climático y las soluciones basadas en la naturaleza.

Desde 1980, la mayoría de los crecientes daños asociados con fenómenos meteorológicos es consecuencia de la acumulación de exposición que conlleva el crecimiento económico y la urbanización. La concentración de activos (humanos y físicos), especialmente en zonas urbanas, tales como regiones costeras bajas que son vulnerables a condiciones meteorológicas adversas, disparan el potencial de daños cuando golpea un fenómeno meteorológico extremo. Otros factores socioeconómicos representan la mayor parte del resto de la tendencia al aumento de los daños con el paso del tiempo[8]. El cambio climático dinamiza el panorama de riesgos y las aseguradoras deben responder en consecuencia. Muchos de los modelos de catástrofe actuales están anclados en el pasado y no tienen en cuenta plenamente el aumento de exposición resultante de la creciente concentración de valor en un mundo en rápida urbanización y, en ocasiones, más vulnerable, en particular, cuando el crecimiento urbano ocurre en regiones de riesgo elevado (Swiss Re, 2020).

En el informe de la ONG Christian Aid de 2020 sobre los efectos del cambio climático en 2019[9]. Todos los desastres están relacionados con el cambio climático provocado por la actividad humana, que o bien ha provocado un evento de mayor intensidad, o bien cambios en los patrones meteorológicos como una disminución de las precipitaciones o temperaturas más altas en el mar. Por otra parte, aunque el Informe se centra en los costes de tipo económico, en muchos países en desarrollo el coste humano en las comunidades vulnerables es aún mayor que el económico. Respecto a las inundaciones los costes se han evaluado en el Medio Oeste de EE. UU. entre marzo y junio en 12.500 millones de dólares, y en China entre junio y agosto en 12.000 millones de dólares. Los eventos que causaron mayores pérdidas de vidas humanas fueron las inundaciones en el norte de la India entre junio y octubre, donde murieron 1.900 personas.

[8] https://www.swissre.com/dam/jcr:25919484-6966-4d47-b0a0-bcb48629d8bc/sigma2_2020_es.pdf
[9] https://www.christianaid.org.uk/sites/default/files/2019-12/Counting-the-cost-2019-report-embargoed-27Dec19.pdf

En España las inundaciones suponen el riesgo más importante tanto por la cuantía de los daños como por su frecuencia y recurrencia. En los últimos 20 años han fallecido en España más de 300 personas debido a las inundaciones y los daños por inundaciones se han estimado en unos 800 millones de euros anuales. El 71 % del total de los daños indemnizados es por causa de este riesgo. El carácter absolutamente extraordinario del año 2019, en el que las inundaciones producidas por una sucesión de eventos en la segunda mitad del año elevaron la composición relativa de los daños causados por este riesgo al 97 % del total, entre los que se encuentran de forma muy destacada los efectos de la inundación de Santa María que afectó especialmente a las provincias de Alicante y Murcia. Dentro de estos eventos destacó especialmente el producido por la DANA de septiembre de 2019, que con 56.552 reclamaciones ha sido el evento de inundación con más solicitudes de indemnización en la historia del Consorcio de Compensación de Seguros, y con un coste para el seguro de riesgos extraordinarios de 479,6 millones de euros ha sido el 4º evento más caro en la historia del seguro de riesgos extraordinarios y la segunda inundación más cara, solo después de las inundaciones del País Vasco de agosto de 1983, que con unas indemnizaciones que hoy se elevarían a 846 millones de euros siguen siendo el evento más caro en la historia del CCS (CCS, 2020).

El fenómeno de las inundaciones es uno de los que mayor impacto socioeconómico tiene en España, agravado en intensidad y frecuencia por el efecto del cambio climático y la ocupación del espacio fluvial. Todo parece indicar que una de las principales consecuencias del cambio climático es que estos episodios hídricos extremos se repitan con mayor frecuencia e intensidad, con lluvias torrenciales que podrían provocar a menudo inundaciones más severas y con periodos de sequía y escasez cada vez más largos e intensos (Trenberth et al., 2014).

El actual contexto de extremos climáticos, con episodios de sequía, escasez e inundaciones cada vez más frecuentes y acusados se hace necesario desarrollar medios de adaptación que mejoren nuestra capacidad para superar dichos episodios con el mínimo impacto en nuestras actividades. En una situación de crisis, la disponibilidad de información objetiva y fiable es de vital importancia para la toma de decisiones, y la antelación con que se disponga de dicha información es, si cabe, más importante aún.

La lucha contra los devastadores efectos de las inundaciones se ha convertido, como hemos visto, desde el siglo XIX hasta nuestros días, en una constante en la política de aguas de nuestro país. La gestión preventiva y evaluación de riesgos por inundación son dos mecanismos imprescindibles de la actuación de las administraciones y los agentes sociales. El Real Decreto 903/2010, de Evaluación y Gestión de Riesgos de inundación, se ocupó de regular tanto los mapas de peligrosidad y riesgo asociado a las inundaciones, como los procedimientos de evaluación y gestión de dichos riesgos en toda la geografía española. Sus disposiciones son de aplicación a las inundaciones causadas por el desbordamiento del cauce de un río, torrente de montaña, entre otras corrientes de agua -intermitente o continuo- así como las inundaciones causadas por las aguas costeras y de transición (Arana, 2017). Con esta regulación se pretende lograr, por un lado, un adecuado conocimiento y evaluación de los riesgos de inundación y, por otro lado, obtener una adecuada coordinación de todas las Administraciones Públicas con el fin de reducir los efectos negativos tanto para la seguridad y salud pública como para el medio ambiente, patrimonio cultural, bienes (públicos y privados), actividades económicas e infraestructuras, derivados de las inundaciones (arts. 1, 2 y 3 R.D. 903/2010).

Los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), tienen como objetivo último lograr una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y la sociedad para reducir las consecuencias negativas de las inundaciones, basándose en los programas de medidas que cada una de las administraciones debe aplicar en el ámbito de sus competencias (MITECO,2020).

El libro que tenemos el honor de presentar *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para*

la generación de territorios resilientes (2020), recoge las ponencias y comunicaciones que se presentaron y fueron revisadas por el Comité Científico del Congreso Nacional de Inundaciones, celebrado en Orihuela, Alicante, los días 10 y 11 de 2020.

REFERENCIAS

- Alberola Romá, A. (Ed.) (2017). *Riesgo, desastre y miedo en la península Ibérica y México durante la Edad Moderna*. Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig y El Colegio de Michoacán, Zamora, Michoacán.
- Arana García, E. (2017). *Riesgos naturales y derecho. Una perspectiva interdisciplinar*. Dykinson, Madrid.
- Bautista Martí, J. (1989). Las avenidas en la cuenca del Segura y los planes de defensa. En: A. Gil Olcina y A. Morales Gil (Eds.), *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*. Instituto de Geografía de la Universidad de Alicante-CAM, Murcia.
- Biener Camacho, S. y Prieto Cerdán, A. (2019) Inundaciones de septiembre de 2019 en la Vega Baja del Segura: causas y consecuencias. *Canelobre*, Nº 70, Instituto Juan Gil-Albert, Diputación de Alicante.
- Calvo García-Tornel, F. (1989). Grandes avenidas e inundaciones históricas. En: A. Gil Olcina y A. Morales Gil (Eds.), *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*. Instituto de Geografía de la Universidad de Alicante-CAM, Murcia.
- CCS (2020). *Estadística de riesgos extraordinarios. Serie 1971-2019*. Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- Cremades Prieto, C. V. (2017). Rogativas pro pluvia y pro serenitate en la cuenca del Segura durante la PEH: la información suministrada por el Archivo Diocesano de Orihuela. En: Armando Alberola Romá (Ed.), *Riesgo, desastre y miedo en la península Ibérica y México durante la Edad Moderna*, 47-69. Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig y El Colegio de Michoacán, Zamora, Michoacán.
- Cremades Prieto, C. V. (2018). Sequías, inundaciones y otras amenazas de la naturaleza. Los recursos espirituales en Orihuela durante la segunda mitad del siglo XVIII. En: Ernesto Cutillas Orgilés (Coord.), *Convergencia y transversalidad en humanidades. Actas de las VII Jornadas de Investigación de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Alicante* (Alicante, 6 y 7 de abril de 2017), 295-302. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alicante, Alicante.
- Ferreras Fernández, C. (2004). *Inundaciones y sequías en la cuenca del río Segura. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, Murcia.
- Generalitat Valenciana (2020). *Estudio sobre el estado de riesgo de la Vega Baja del río Segura frente a inundaciones provocadas por fuertes lluvias y la necesidad de realizar un plan de infraestructuras hidráulicas. Propuesta de soluciones. Análisis DANA septiembre 2019*. Direcció General de l'Aigua, Subdirecció General de Planificació e Infraestructures Hidràuliques de la Generalitat Valenciana, Valencia.
- Gil Olcina, A. y Morales Gil, A. (Eds.) (1989). *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*. Instituto de Geografía de la Universidad de Alicante-CAM, Murcia.
- Melgarejo, J. (2001). El visionario proyecto contra las avenidas de R. García y L. Gaztelu. Más de un siglo de vigencia. En: Joaquín Melgarejo (Ed.), *Proyecto de Obras de Defensa contra las Inundaciones en el valle del Segura, 1886*. (Reimpresión). CHS, Ministerio de Medio Ambiente, Murcia.
- MIMAM (2000). *El Libro blanco del Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente, España. Madrid.
- MITECO (2020). *Página web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, apartado gestión del riesgo de inundación*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/
- Trenberth, K., Dai, A., van der Schrier, G. et al. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Clim Change,* 4, 17-22. https://doi.org/10.1038/nclimate2067
- - Swiss Re (2020). Catástrofes naturales en tiempos de acumulación económica y riesgos climáticos. *Swiss Re Sigma*, 2

PRÓLOGO: CONVIVIR CON LA INUNDACIÓN

Jorge Olcina Cantos
Universidad de Alicante

> "Aceptemos la proposición de que la naturaleza constituye, en sí, un proceso, que interactua, que obedece unas leyes, que representa valores y oportunidades abiertas al disfrute del ser humano, con una serie de limitaciones e incluso prohibiciones en ciertos casos."
>
> Ian L. McHarg. *Proyectar con la naturaleza*, 1992.

Las inundaciones son consustanciales al desarrollo las civilizaciones sobre la superficie terrestre. La búsqueda de agua para la práctica de la agricultura y la instalación de ciudades es una constante de la historia de la humanidad. La proximidad a cursos fluviales garantizaba cosechas y abastecimiento. De manera que el ser humano ha intentado siembre aproximarse a los ríos, respetando sus normas, pero expuestos a su comportamiento a veces extremo. Una acción de cara bifronte que ha comportado beneficios, pero, en ocasiones, desastre y desolación. Las riberas de los ríos han sido siempre espacios de interés para la ocupación humana, en convivencia habitual, respetuosa y sabedora, eso sí, del peligro existente.

La mejora de la técnica, a lo largo del siglo XX y especialmente en su segunda mitad, favoreció procesos de ocupación de espacios de riesgo. De aquellas zonas que se sabían de inundación más frecuente pero que podían ser resguardadas, en el mejor de los casos, con obras de ingeniería hidráulica; en otras ocasiones, la ocupación se ha producido sin defensa alguna. La convivencia comienza a ser problemática; se pierde el respeto la naturaleza, bajo la idea de la supuesta superioridad de la técnica frente a todo. De manera que, en la historia reciente no siempre se ha respetado el funcionamiento, a veces torrencial, de los cursos de agua. El ámbito mediterráneo ha sido un buen ejemplo de esta evolución. Aquí el agua ha sido fuente de vida, de riqueza, pero también de daños y duelo.

La historia nos muestra, pues, que es posible la convivencia del ser humano con los espacios fluviales; incluso que esa convivencia sea beneficiosa para ambos. El problema surge cuando una de las partes, generalmente la humana, intenta dominar a la otra, forzando dinámicas que son inadecuadas con el funcionamiento natural de los ríos. Se genera riesgo como expresión espacial de actuaciones humanas indebidas sobre un entorno fluvial que ponen en jaque la propia vida. La probabilidad del desastre se convierte en el elemento geográfico destacado, que condiciona el desarrollo de dicho territorio. Hasta que ocurre el evento extremo y nos recuerda la necesidad de respetarla dinámica natural. Aunque el recuerdo, suele durar poco...

La inundación puede ser una oportunidad para mejorar la organización territorial. Aunque no siempre es sencillo o posible. La ocupación de llanos de inundación son procesos históricos que se han consolidado hasta la actualidad, con acumulación de usos del suelo, a veces no compatibles con la dinámica natural de estos espacios. El anegamiento de una parcela agrícola por una crecida fluvial causa perjuicio económico; la inundación de una zona industrial o urbana genera muchos más daños y, lo peor, puede suponer la pérdida de vidas humanas. Se establecen así grados de riesgo en un espacio geográfico, en relación con los efectos que puede causar un peligro natural como son las crecidas fluviales que originan desbordamiento de su lecho ordinario y, por consiguiente, inundaciones de mayor o menor entidad.

En el mundo se pierden miles de vidas al año por efecto de las inundaciones de causa diversas. Varios informes, de organismos oficiales y de entidades de defensa ambiental, señalan que mil millones de personas viven en zonas de muy alto riesgo de inundación, generalmente en tramos bajos y desembocaduras fluviales. Y la evolución climática futura, en el contexto actual del calentamiento climático de causa antrópica, no va a mejorar la situación. Se calcula que 1.600 millones de personas ocupan espacios con riesgo de ser anegados a mediados del presente siglo por crecidas fluviales o aumento del nivel del mar, lo que representa el 20% de la población mundial.

El Europa, el reciente informe *Peseta IV* (2020) del Joint Research Center de la Comisión Europea, que trabaja con la hipótesis de un calentamiento climático de 3º C para el año 2100 -más realista que los 2º C del Acuerdo de París a la vista de la evolución reciente de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera-, señala que los daños por inundaciones fluviales en la UE y el Reino Unido serían seis veces las pérdidas actuales valoradas en 7.800 millones de euros/año y casi medio millón de personas estarían expuestas a las inundaciones de los ríos cada año, en comparación con las 170.000 actuales. De manera que el objetivo de reducir este calentamiento a 1,5 °C –algo que ya resulta bastante utópico- reduciría a la mitad estos impactos económicos y reduciría el número de personas expuestas en 230.000. Las regiones del sur de Europa son las más expuestas a estos efectos, al ser ya un territorio de alto riesgo frente a inundaciones y manifestar evidencias claras de calentamiento.

En España, el Observatorio de la Sostenibilidad (2019) ha calculado que 977.000 personas viven en zonas de inundación para un período de retorno de 500 años. Las superficies artificiales situadas en áreas con riesgo alto de inundación se han calculado en 26.863 ha para dicho período de retorno. Por su parte, el estudio señala que los daños provocados por las inundaciones podrían elevarse a 20 mil millones de euros anuales en la década de 2020, a 46 mil millones de euros anuales en la década de 2050, y a 98 millones de euros anuales en la década de 2080.

Estamos, por tanto, ante una cuestión importante que, a la vista de la evolución reciente, no va a ir a menos sino a más en las próximas décadas, por la propia acción del ser humano sobre la superficie terrestre y por el aumento de la peligrosidad climática que señalan los modelos climáticos para las próximas décadas. No en vano, el Foro económico mundial de Davos lleva años señalando que, entre los 5 temas destacados (highlights) anualmente en la economía del planeta, el cambio climático, los extremos atmosféricos y la gestión del agua, ocupan un lugar principal que obliga a los gobiernos y empresas a tomar medidas para minimizar sus efectos.

El tratamiento del riesgo de inundación ha experimentado cambios notables en las últimas décadas, tanto en los aspectos de análisis como de las acciones para su reducción. En el análisis se ha pasado de la descripción del fenómeno y de sus consecuencias desde el punto de vista físico (peligrosidad), al estudio de los factores que ocasionan un impacto mayor o menor de su ocurrencia, esto es, de los aspectos socio-territoriales (vulnerabilidad y exposición). En las medidas de reducción del riesgo se ha pasado de la consideración exclusiva de la obra civil como única solución posible para garantizar la seguridad, a la incorporación de la ordenación del territorio y de la cartografía como herramientas eficaces y con escaso coste económico y ambiental, para dicho fin. Y a ello se ha unido la necesaria buena comunicación y educación para el riesgo, con mensajes ciertos que deben alejarse del catastrofismo.

La aparición de normativas que obliga a la consideración del riesgo natural, especialmente del riesgo de inundación, en los procesos territoriales ha sido determinante para el desarrollo de planes de ordenación del territorio de carácter específico para la reducción del riesgo. La Directiva Europea de inundaciones (60/2007) inaugura un nuevo ciclo en el tratamiento del riesgo basado no en las medidas

estructurales, que hasta entonces habían sido la acción recurrente tras un evento catastrófico. En los últimos años, muchos países han optado por las acciones "blandas" y la correcta ordenación de nuevos usos en el suelo, en áreas sin riesgo, a la hora de aplicar medidas de reducción en territorios con riesgo de inundación. Se valora la delimitación de áreas de sacrificio, esto es, de espacios de inundación natural, donde el río, en fase de crecida, puede depositar su caudal momentáneamente. Se fijan acuerdos con los propietarios de esos terrenos, o la propia administración se hace con su propiedad, para evitar la construcción de diques en los márgenes fluviales que conllevan siempre impacto visual y deterioro ambiental (vegetación de ribera).

En España se asiste a este proceso de cambio en la consideración del riesgo natural en las fases post-desastre y la incorporación progresiva en las acciones de ordenación del territorio, aunque se trata de un proceso que debería tener mayor dinamismo. El desastre del camping de Biescas (Pirineo aragonés), ocurrido en agosto de 1996, derivó en efectos políticos que contribuyeron con la generación de un consenso generalizado en que la planificación del territorio es la medida preventiva más sostenible, adaptativa y económicamente rentable en la mitigación de las pérdidas causadas por inundaciones. La Directiva de evaluación y gestión de los riesgos de inundación (60/2007) de la Unión Europea contribuyó en España de modo decisivo a la consideración de la ordenación territorial como herramienta eficaz para la reducción del riesgo de inundación. Esta norma ha primado las acciones de ordenación territorial y la elaboración de cartografía oficial de riesgo en los países de la Unión Europea. Esto implicó la adopción de normas ambientales o específicamente hidráulicas además de la modificación de las normativas del suelo en función de la elaboración de planes de ordenación territorial para el riesgo de inundaciones que obliga esta norma europea. En España, la incorporación de cartografía e informes de riesgos en la escala local ha sido efectiva a partir de la modificación de la Ley estatal del Suelo en 2008, que ha tenido una versión revisada en 2015. En el artículo 22 de esta ley señala, explícitamente, que la acreditación de la condición de riesgo de un espacio geográfico está determinada por la elaboración de un mapa de riesgo. De manera que, desde 2008, no existe excusa legal en España para omitir la elaboración de cartografía de riesgo en los planes urbanísticos, bien de nueva factura o bien con la utilización de las cartografías oficiales existentes (SNCZI o cartografías existentes en algunas Comunidades Autónomas). Otra cuestión es la vigilancia que las administraciones local y regional deben llevar para el cumplimiento efectivo de este precepto normativo. La redacción del artículo 22 de la Ley del Suelo ha sido demasiado laxa. Se habla de "riesgos naturales" sin detallar qué riesgos naturales deben priorizarse y cuáles pueden tener un carácter complementario en cada caso. Lo que ha derivado en la elaboración, en la mayoría de casos, de mapas de peligrosidad o de riesgo de inundación casi en exclusiva, obviando otros peligros naturales de impronta territorial destacada (deslizamientos, temporales en la costa, etc.).

El componente "territorial" en la reducción del riesgo de inundaciones se ha ido incorporando en normas y planes elaborados por las Comunidades Autónomas que, en algunos casos, han elaborado cartografías de peligrosidad y riesgo de obligada observancia en los procesos de planificación territorial a diferentes escalas. No en todas las regiones se han elaborado normas o planes en este sentido, pero deben destacarse los casos del País Vasco, Navarra, Cataluña, Baleares, Comunidad Valenciana, Andalucía y Canarias. Se trata, por lo demás, de aquellos territorios que han hecho una apuesta por la sostenibilidad como principio de ordenación del territorio, considerando que un principio de sostenibilidad territorial es la reducción del riesgo natural o tecnológico. Incluso se han elaborado cartografías oficiales de obligada consulta en los procesos de planificación de escala subregional o local. En algunos casos, la normativa que acompaña a estos planes de actuación territorial de carácter sectorial, llega a limitar usos del suelo en relación con el nivel de riesgo existente en el territorio objeto de actuación, como ocurre con el PATRICOVA en la Comunidad Valenciana.

Con anterioridad a esta normativa urbanística, el único documento que podía acreditar el nivel de riesgo de un territorio era el plan de inundaciones contemplado en la legislación de Protección Civil

(Directriz Básica de Inundaciones de 1995), que ha tenido una implementación muy lenta y nada efectiva en su aplicación a los procesos urbanísticos. A la hora de elaborar los mapas de riesgo de inundación, además de las determinaciones de la Directiva 60/2007, debe llevarse en cuenta la caracterización de las zonas que comprende el dominio público hidráulico incluida en la modificación del Reglamento de Dominio Público Hidráulico de 2016 (RD 638/2016), donde por vez primera se incorporan criterios geomorfológicos e históricos en la delimitación de las zonas inundables. E igualmente se señala la obligación por parte de los promotores inmobiliarios de anotar en el Registro de la Propiedad el carácter inundable o no del suelo donde se lleva a cabo una actuación residencial, haciéndose garantes de la seguridad mediante su responsabilidad civil.

Se presenta en este volumen las aportaciones de investigadores y especialistas en procesos de inundación, en sentido integral, desde sus diversos cambios de conocimiento o acción pública y privada: sus causas físicas y antrópicas, sus efectos, y las acciones para la reducción del riesgo en los territorios afectados. Forman un elenco de autores de lo más cuajado que hay, en estos momentos, en el mundo académico y en la administración, dentro del estudio y comprensión de los procesos de inundación. El libro aborda la cuestión de las inundaciones con visión múltiple e integradora, porque no hay otro modo de hacerlo, si se quiere reducir, de forma efectiva, el riesgo existente en algunos territorios. En nuestro país, recordemos, hay tres grandes "regiones-riesgo" frente a las inundaciones: el País Vasco, Canarias y el litoral mediterráneo en su conjunto, incluidas las islas Baleares. Son áreas con peligrosidad elevada y, sobre todo, con un alto grado de ocupación del territorio (elevada vulnerabilidad y exposición).

Orihuela, ciudad histórica del territorio valenciano que acoge este Congreso, ha conocido, junto al resto de la Vega Baja del Segura, inundaciones terribles que han consolidado el carácter de una población abierta y laboriosa que sabe sobreponerse a los desastres. Y, siendo esta actitud un valor incalculable, no es suficiente para que un territorio, una ciudad, pueda ser más resistente a una gran inundación y recupere más pronto la normalidad; se requiere acción pública en forma de actuaciones y planes en todas las escalas de la administración, desde el municipio hasta Europa. Desde la creencia firme de que lo importante en la vida de las personas y los valores ambientales del territorio.

Con la inundación, en territorios con ocupación humana, se debe convivir. Esa convivencia debe ser lo más "normal", lo más lógica, posible; sabiendo que los ríos, a veces, crecen y se desbordan o recuperan su espacio ahora ocupado por el ser humano. Si generan daños cuantiosos y pérdida de vidas humanas y lo hacen con frecuencia elevada, esa convivencia deja de ser armoniosa; denota conflictos por el uso del suelo; deja de haber respeto entre el medio físico y el ser humano.

A finales de noviembre de 1930, el río Segura experimentó una crecida a causa de una situación de "gota fría" y del temporal de lluvias asociado. Nuestro poeta universal, Miguel Hernández, relató con la belleza de la normalidad este episodio; tiempos de convivencia armoniosa de un territorio, de una ciudad, con su río; de unos habitantes que, sabedores de sus "enfados", no excedían arbitrariamente sus límites más allá de lo posible. Una situación que hoy ya no se encuentra; que ha tornado en problema a resolver.

"El río enfurecióse; se puso hinchado y rojo
y al mar llevó sus aguas con ímpetu a verterlas"

Miguel Hernández, *Destellos de Orihuela*,
31 de diciembre de 1930.

BLOQUE I
Fenómenos hidrometeorológicos y planificación territorial.



Excmo. Ayuntamiento de Orihuela

DIPUTACIÓN DE ALICANTE CICLO HÍDRICO

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

EFICACIA DE LAS MEDIDAS MULTI-ESCALA PARA REDUCIR EL POTENCIAL EROSIVO Y LOS ARRASTRES DE SEDIMENTOS EN CUENCAS SEMI-ÁRIDAS

Luis G. Castillo Elsitdié
luis.castillo@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-6859-7232

Juan T. García Bermejo
juan.gbermejo@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-7204-688X

Juan Manuel García-Guerrero
jm.guerrero@upct.es
http://orcid.org/0000-0001-7784-0284

José María Carrillo Sánchez
jose.carrillo@upct.es
https://orcid.org/0000-0003-4264-3269

Francisco Javier Pérez De La Cruz
javier.cruz@upct.es
https://orcid.org/0000-0001-8684-3962

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena, España

RESUMEN

A partir de la modelización de los procesos de erosión hídrica en diversas cuencas situadas en el Campo de Cartagena (Murcia), se analiza la eficacia de diversas medidas para reducir el arrastre de sedimentos y favorecer la sedimentación de los suelos erosionados, reduciendo así la pérdida de suelo y el vertido de sedimentos al medio receptor, que en este caso es el Mar Menor. El presente trabajo estudia la influencia de la práctica de laboreo, la eficacia de ubicar embalses de sedimentación, tanto a escala de parcela como a escala de cuenca, así como la importancia de disponer de una red de cauces para la gestión de la dinámica de sedimentos. Los cálculos se han realizado mediante un software propio basado en una ecuación dinámica tipo Exner a escala de reguero, RillErosionMOdelling (REMO), determinando el tránsito de los sedimentos a escala de parcela y de cauce. Los resultados se comparan con los obtenidos mediante el software SWAT. Los valores obtenidos remarcan la importancia de una gestión agronómica, así como la de disponer de una red de drenaje y cauces adecuada.

1. INTRODUCCIÓN

La Región de Murcia posee un clima semiárido, con precipitaciones en el rango de los 200-400 mm/año y donde la evapotranspiración potencial supera la lluvia en al menos un 54% anualmente (UNEP, 1997). La desertificación se considera una degradación de las tierras, entendida como la

reducción o pérdida de la productividad biológica o económica por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas. Entre los motivos de la desertificación se encuentra la erosión del suelo causada por el viento o el agua. La agricultura, bien usada, constituye una de las herramientas más importantes para evitar la erosión y la desertificación, así como para propiciar el desarrollo sostenible de la Región de Murcia (Castillo, 1996; Bermúdez y Díaz,1998).

El Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012 (INES, 2002) calcula la erosión hídrica laminar y en regueros a partir de la metodología RUSLE (Wischmeier y Smith, 1978; USDA website), obteniendo valores en el rango de 0 – 10 t/ha anuales de suelo erosionado para la zona de estudio del Campo de Cartagena (Murcia). En la bibliografía se recogen mediciones en campo realizadas en la Región de Murcia, con valores en el rango de 0.2 a 10 t/ha/año (Díaz et al., 2011). En este mismo estudio se hace referencia a parcelas cultivadas y aradas donde se registran tasas de erosión en el rango de 0.78-1.20 t/ha/año. Asimismo, en áreas de pendiente < 0.1%, en la denominada cuenca de El Albujón, se obtienen valores en torno a 0.80 t/ha/año a partir de los cálculos realizados aplicando la ecuación universal de erosión del suelo USLE (Conesa, 1989).

La erosión hídrica laminar y en regueros depende de diversos factores como son: i) la capacidad erosiva de la lluvia; ii) la capacidad del suelo a ser erosionado según su composición y textura; iii) la pendiente del terreno; iv) la cobertura vegetal y el tipo de labor o gestión que se hace del mismo, como puede ser el tipo de labor según la pendiente máxima del terreno o perpendicular a esta o de contorno. En función de la lluvia registrada y su torrencialidad, entendida ésta como la intensidadmáxima de la lluvia, podemos encontrarnos con una tasa de erosión anual con una elevada variabilidad. El Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (ARS-USDA) desarrolló algunos modelos para el cálculo de la erosión del suelo denominados empíricos paramétricos, como es el caso de USLE, MUSLE o RUSLE que consideran la influencia de los cuatro factores enumerados anteriormente (Wischmeier y Smith, 1978), y engloban en una única ecuación el cálculo de la erosión hídrica laminar y en regueros, incluyendo los procesos de: disgregación del suelo por la acción de la lluvia al impactar sobre el suelo, erosión del suelo por parte de la escorrentía, y el transporte de los materiales movilizados. Con posterioridad, el ARS-USDA desarrolló el modelo WEPP (Flanagan et al., 2007) que evalúa el arrastre de los sedimentos en regueros mediante una ecuación de continuidad en estado estacionario aplicada a incrementos de longitud de terreno. El modelo matemático propuesto por Meyer and Wischmaier (1969) es el que recoge WEPP. Otros modelos son dinámicos y distribuidos, como el Modelo Europeo de Erosión del Suelo (EUROSEM) capaces de simular el transporte de sedimentos, la erosión y la sedimentación en flujos en reguero y fuera de reguero, considerando tormentas individuales, tanto para campos individuales, como para pequeñas cuencas (Morgan et al., 1998).

En el presente trabajo se utiliza un modelo dinámico desarrollado por la UPCT denominado REMO, así como el conocido software SWAT, con el fin de evaluar los procesos erosivos y de arrastre de sedimentos a escala de parcela y de subcuenca. De este modo se puede evaluar la eficacia de una serie de medidas multi-escala encaminadas a la reducción del potencial erosivo, así como los arrastres de sedimentos. Los resultados obtenidos permiten visualizar la gran influencia e importancia de acometer prácticas de gestión agronómica, así como de disponer de una red de cauces vertebradores de la escorrentía, que participan en la retención de sedimentos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio posee una superficie superior a los 500 km^2. El área de estudio se ha subdividido en 8 cuencas principales, que a su vez contienen un total de alrededor de 400 subcuencas con superficies aproximadas de en torno a 1 km^2 cada una (Figura 1). Las cuencas se encuentran ubicadas

en la zona norte del Campo de Cartagena y pertenecen a los núcleos urbanos de Torre Pacheco, Los Alcázares, San Javier, San Pedro del Pinatar y el Pilar de la Horadada, núcleos urbanos a través de los que desembocan en el Mar Menor. Para los análisis a realizar se ha subdividido cada una de las subcuencas en las parcelas catastrales que las componen, obteniendo alrededor de 70.000 parcelas.

La Figura 2 muestra una zona de una subcuenca donde se pueden visualizar las parcelas. A continuación, se ha circunscrito un rectángulo a cada parcela mediante ARCGIS, definiendo cuál de los lados del rectángulo se aproxima más a la pendiente máxima.

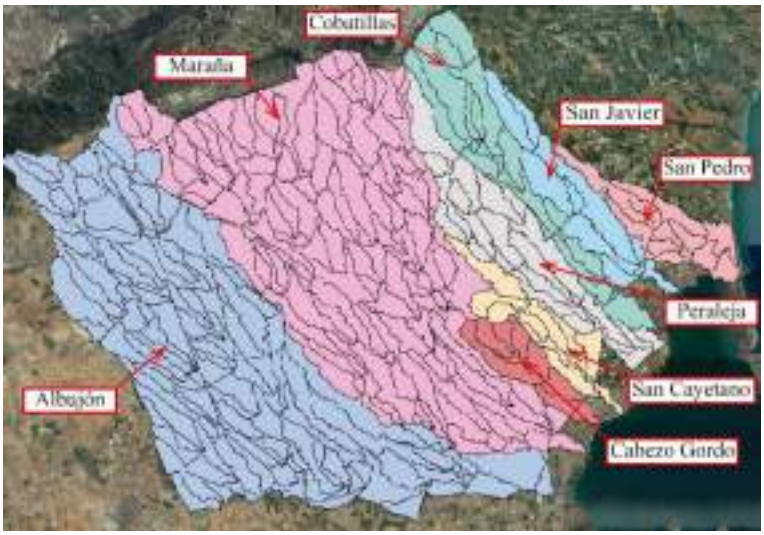


Figura 1. Área de estudio formada por 8 cuencas y alrededor de 400 subcuencas.



Figura 2. Vista de las parcelas catastrales (izqda.) y rectángulos asociados a cada parcela (dcha.).

2.2. Granulometría de los suelos en el área de estudio

En el marco del Proyecto LUCDEME (Alías et al., 1988) desarrollado en la Región de Murcia se llevó a cabo la caracterización en cuanto a sus porcentajes de arenas, limos, arcillas y materia orgánica de las capas superiores del suelo. En vista de las características principales de los suelos existentes en las zonas de estudio del presente trabajo, se ha adoptado una curva granulométrica media que contiene un 45% de limos y arcillas, 45% de arenas y un 10% gravas. A su vez, dichos porcentajes se dividen en tres curvas granulométricas que corresponden a limos y arcillas, arenas finas y gruesas, y gravas. De manera resumida, los valores de las curvas granulométricas poseen su diámetro d_{50} siguiente:

d_{50} limos y arcillas = 30 µm
d_{50} arenas = 600 µm
d_{50} gravas = 7 mm

De cara a calcular la rugosidad del cauce de los regueros, se ha considerado el diámetro d_{90} = 0.003 m.

2.3. Modelos empleados para los cálculos. REMO y SWAT

El Grupo de I+D+i Hidr@m perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena ha desarrollado un software de erosión y transporte de sedimentos en parcelas agrícolas cultivadas, en donde se conceptualiza la escorrentía en los denominados canales o regueros que adoptan distintas dimensiones o la forma de un plano inclinado. El software se denomina **REMO** (**R**ill **E**rosion **MO**delling), y que ha sido programado a través del software MATLAB. El software integra una ecuación dinámica tipo Exner partiendo del modelo matemático propuesto por Meyer y Weischmaier (1969). El software parte de la lluvia bruta registrada y calcula la lluvia neta mediante la ecuación de Horton, la escorrentía mediante la ecuación de la onda cinemática (Bras, 1974), la erosión de la lluvia, D_i, mediante la ecuación empírica propuesta por Weischmeier y Smith (1978), la capacidad erosiva de la escorrentía, D_r, tal y como recoge el modelo WEPP (Elliot et al., 1989) y las ecuaciones de capacidad de transporte de sedimentos en flujos someros, T_C, de Yalin, Govers y Low recogidas por Ferro (1995).

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} - [D_i + D_r] = 0 \quad (1)$$

donde D_i es la erosión hídrica, D_r la erosión generada por la escorrentía, G la carga de sedimento transportada (kg/m/s) cuyo límite superior es T_C, C la concentración de sedimento (kg/L), A la superficie del incremento de longitud x de estudio. La Ecuación 1 permite corregir la pendiente del reguero, así como recoger los procesos de erosión y sedimentación de los sólidos transportados a lo largo del reguero. En la Figura 3 se muestra el esquema de los cálculos realizados mediante el modelo matemático REMO.

A continuación, se recogen los resultados de la simulación para la lluvia registrada en septiembre de 2019, considerando un reguero de 1000 m de longitud, una pendiente inicial de 3%, y sobre un plano inclinado de 1 m de ancho. Los resultados corresponden con el punto de desagüe de dicho plano de 1000 m de longitud.

La Figura 4 muestra diversas gráficas obtenidas a partir del modelo REMO como son la lluvia neta, una vez descontada la infiltración; el caudal escurrido representado a la salida del reguero; el caudal sólido total erosionado por la lluvia en el reguero completo, D_i; el caudal arrastrado por la lluvia a la salida del reguero para el diámetro de sólido de 600 micras, G; y la evolución de la pendiente del reguero en su tramo final para el caso de diámetro de 30 y 600 micras.

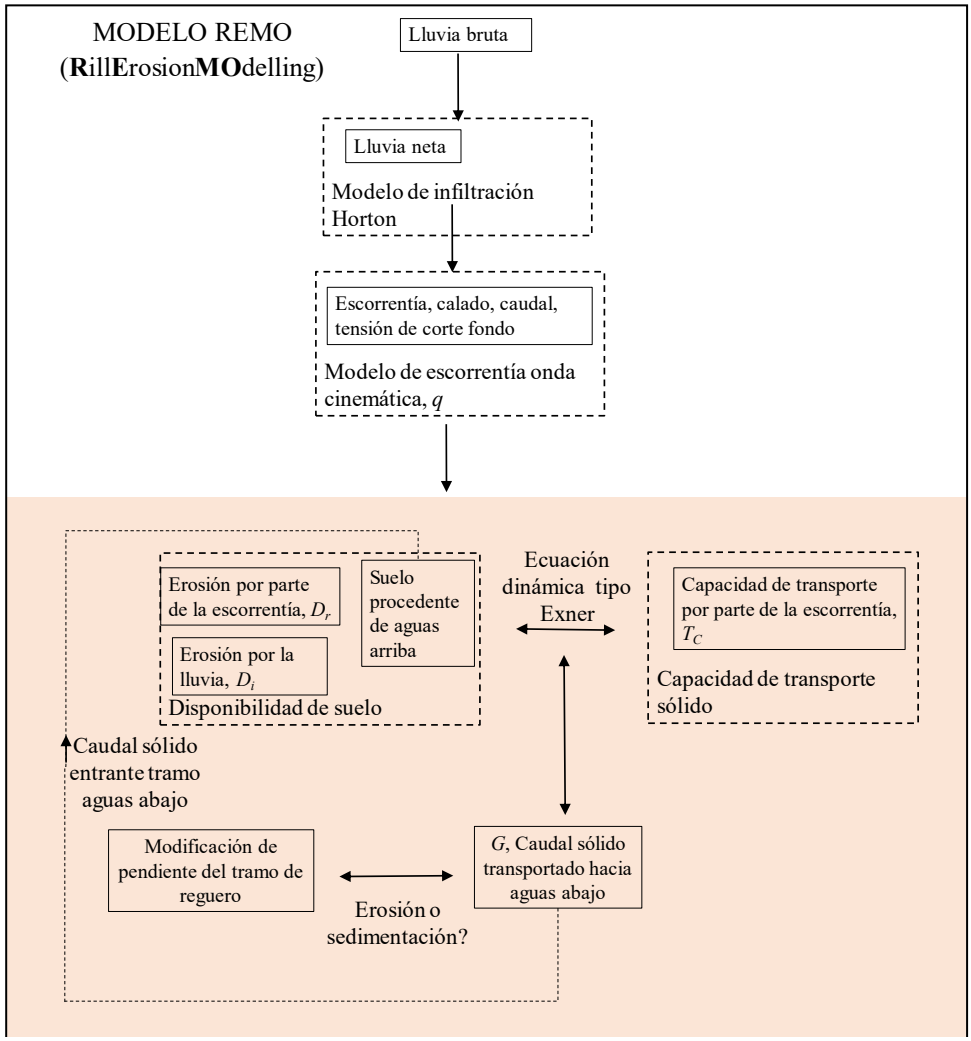


Figura 3. Esquema de cálculos realizados por el modelo REMO en cada iteración.

Adicionalmente, la lluvia neta se ha comprobado con los valores resultantes en el modelo HEC-HMS disponible, que hace uso del método de infiltración del número de curva, cumpliendo satisfactoriamente. Del mismo modo, el caudal escurrido en un reguero se ha comprobado con el modelo SWMM que hace uso del modelo de onda cinemática.

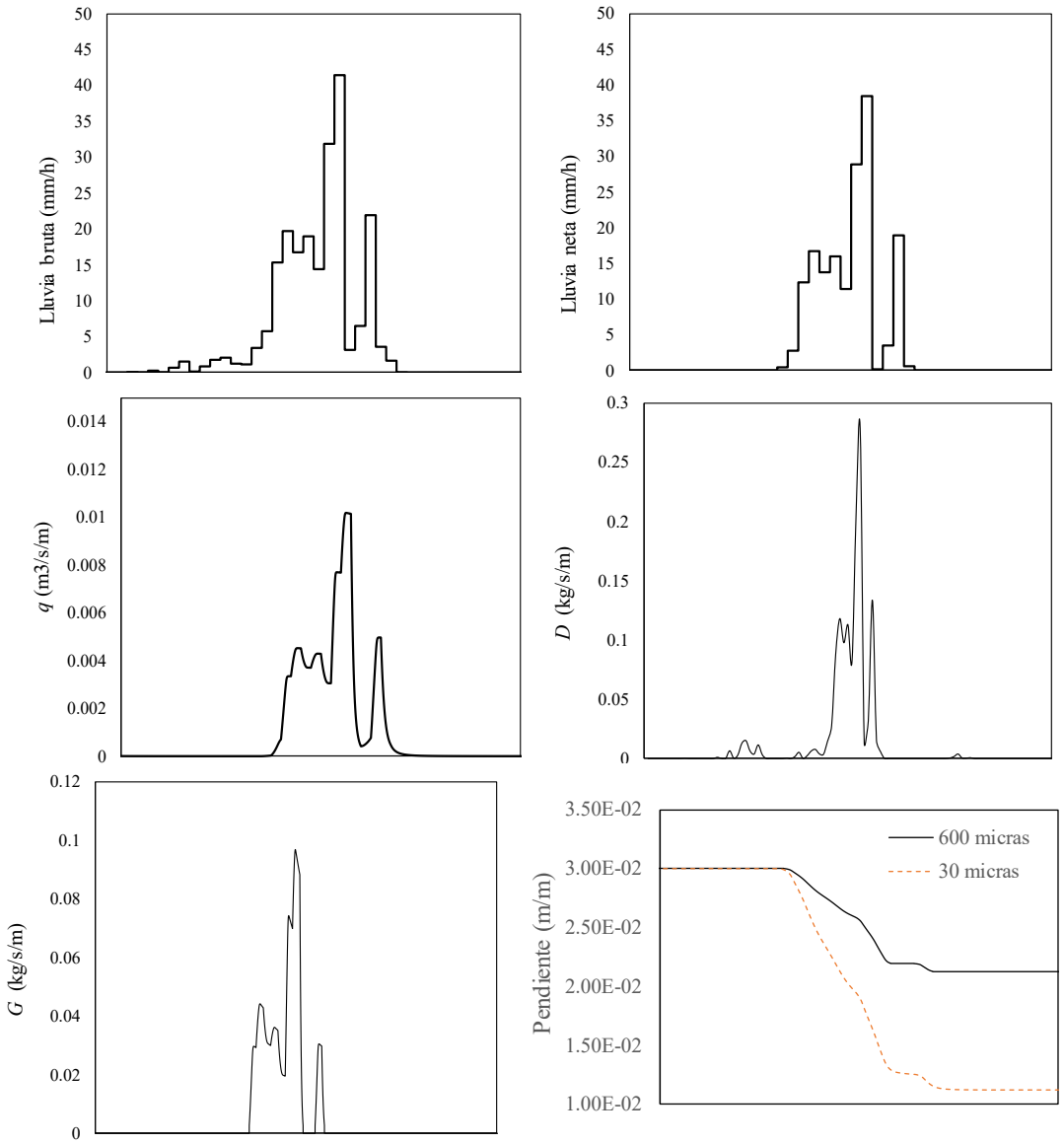


Figura 4. Resultados de la simulación a la salida de reguero de 1000 m de longitud con sección plana.

La Figura 5 muestra la representación gráfica del caudal sólido transportado respecto al caudal líquido para la lluvia de septiembre de 2019. Se observa una cierta histéresis a lo largo de la evolución del caudal sólido, donde al inicio del proceso erosivo un determinado caudal líquido da lugar a mayores valores transportados que el mismo caudal líquido instantes posteriores del hidrograma.

Esto es debido a que el proceso erosivo ha reducido la pendiente, protegiéndose de dicha erosión para sucesivos caudales líquidos.

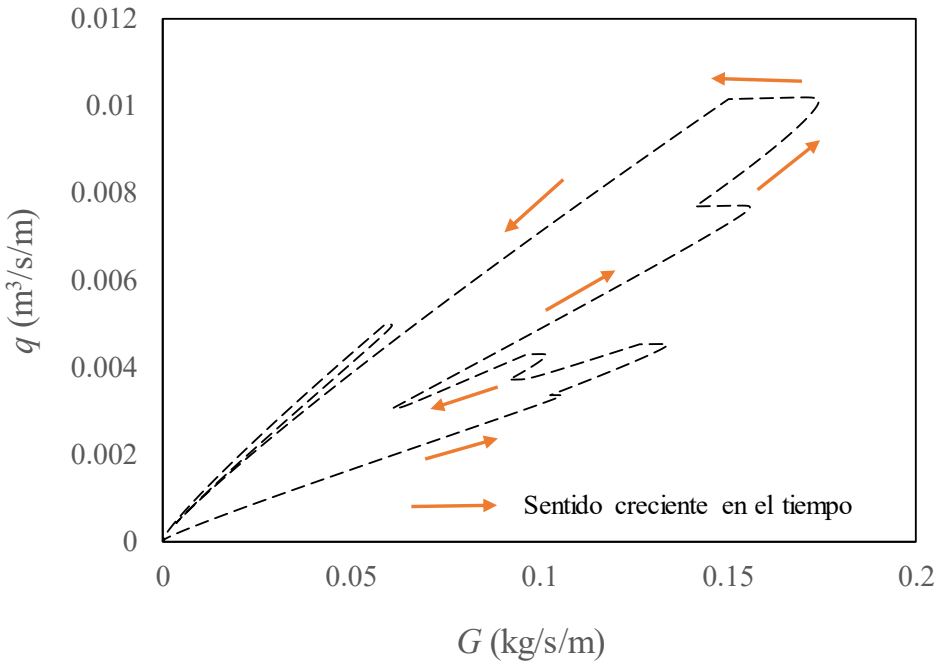


Figura 5. Curva de histéresis del sedimentograma a lo largo del episodio de septiembre 2019.

El paquete computacional SWAT (Uribe, 2010) permite predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de escorrentía y de arrastre de sedimentos en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado. SWAT es un modelo continuo de tiempo que permite realizar análisis de paso diario con series temporales de años (Neitsch et al. 2011, Uribe 2010). El programa divide las áreas de estudio en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), que son las unidades mínimas de cálculo creadas a partir de áreas donde existe homogeneidad en cuanto a la pendiente, cobertura del suelo y tipo litológico del suelo. SWAT calcula la producción de erosión y sedimento arrastrado para cada HRU mediante un modelo empírico paramétrico a partir de la ecuación modificada de pérdida universal de suelo MUSLE (William, 1975).

2.4. Formulación empleada para el cálculo de la sedimentación en embalses

Se ha utilizado una ecuación de mezcla completa en embalse que tiene en cuenta la superficie eficaz de sedimentación y que introduce además los efectos de turbulencia desde un punto de vista empírico (Perdek, 1998). Así, se plantea la ecuación de continuidad para el cálculo de la concentración de sólidos en suspensión a la salida del embalse:

$$\frac{d(SC)}{dt} = I(t)C^I(t) - Q(t)C(t) - EC(t)S(t) \qquad (2)$$

$$E = 1 - e^{\frac{-w}{V_s}} \qquad (3)$$

donde S es el volumen almacenado en el embalse en el instante t en m^3, I el caudal de entrada en el instante t en m^3/s, C^I la concentración de sólidos en suspensión del influente en mg/L, C la concentración de sólidos en suspensión del efluente en mg/L, Q el caudal de salida del embalse en el instante t, E el coeficiente de eliminación de contaminantes por sedimentación para la situación de máxima turbulencia, w la velocidad de sedimentación de la partícula en m/s, y V_s la velocidad ascensional del flujo en el instante t en m/s.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han realizado diferentes simulaciones con los programas REMO y SWAT, comparándose los resultados obtenidos.

REMO caracteriza los procesos erosivos y de arrastre de sedimentos de cada parcela bajo dos hipótesis: asumiendo la pendiente según la dirección del gradiente máximo o, lo que se consideraría laboreo en contorno, con una pendiente menor a 0.5%. De esta forma obtendremos dos valores de sedimentos arrastrados. La longitud del reguero se ajusta a la de un lado del rectángulo que conceptualiza cada parcela, mientras la otra longitud se obtiene dividiendo el área real de la parcela por la primera de las longitudes seleccionadas. Este proceso se realiza para todas las parcelas. Para la ejecución de cada reguero se ha calculado además el valor del factor *K* de erosionabilidad del suelo que depende del tipo de suelo (cuyo valor medio es de 0.4). Cada parcela cultivada se conceptualiza como un reguero y se introducen las dimensiones de cada reguero (Figura 6).

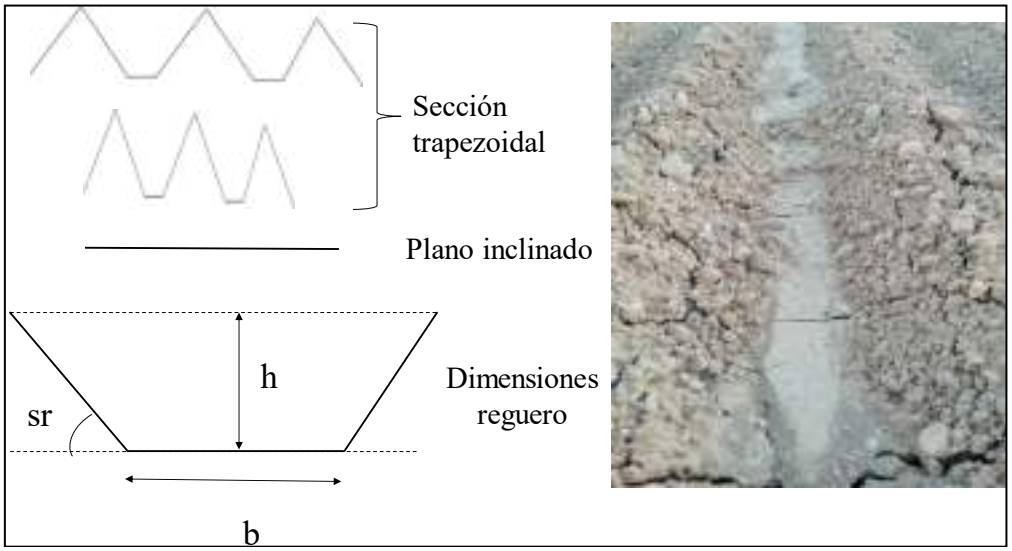


Figura 6. Esquema de tipos de regueros y dimensiones adoptadas en REMO.

SWAT utiliza los valores de precipitación diaria tomados de las estaciones del IMIDA en el periodo comprendido entre 2009-2020, donde los tres primeros años se ha utilizado como periodo de calentamiento por lo que los resultados presentados corresponden al periodo 2012-2020. Para la simulación se ha realizado una correspondencia de los tipos de suelo LUCDEME con los tipos suelo de la FAO, y cuya base de datos incluye SWAT. Las unidades de respuesta hidrológica (HRU) coinciden con cada una de las subcuencas. El uso del suelo se ha tomado del proyecto SIOSE (Del Bosque et al., 2005). Algunos de los parámetros del modelo MUSLE, como por ejemplo el parámetro *K*, dado el tipo de suelo, son aproximadamente de 0.4 y los valores de *C* se calculan a partir del uso del suelo con valores mínimos que están alrededor de 0.2. Los valores de *P* se aproximan a la unidad, adoptando de esta forma el laboreo paralelo a línea de pendiente máxima como única simulación. Las simulaciones se han realizado con paso diario.

3.1. Simulación de la lluvia de septiembre de 2019. Comparativa REMO y SWAT. Caso de la Rambla de La Maraña

Se muestra a continuación una comparativa de los resultados obtenidos para la lluvia registrada en septiembre de 2019, cuyo valor medio de precipitación en cada una de las subcuencas fue superior a los 200 mm. En la comparativa se analizan también los sedimentos arrastrados calculados mediante

REMO y SWAT para varias subcuencas situadas dentro de las cuencas de La Maraña, Cobatillas y Peraleja, ubicadas tanto en cabecera como en la parte baja respectivamente. Las Figuras 7-12 muestran el hidrograma calculado por REMO y el obtenido mediante el modelo HEC-HMS, la lluvia neta de escorrentía, así como los sedimentos arrastrados calculados para los diámetros de 30 y 600 micras representativos de las granulometrías de arcillas y limos, y de arenas. Dichas curvas granulométricas arrastradas se han calculado para dos hipótesis: pendiente del reguero según la pendiente máxima o según la línea de nivel o en contorno.

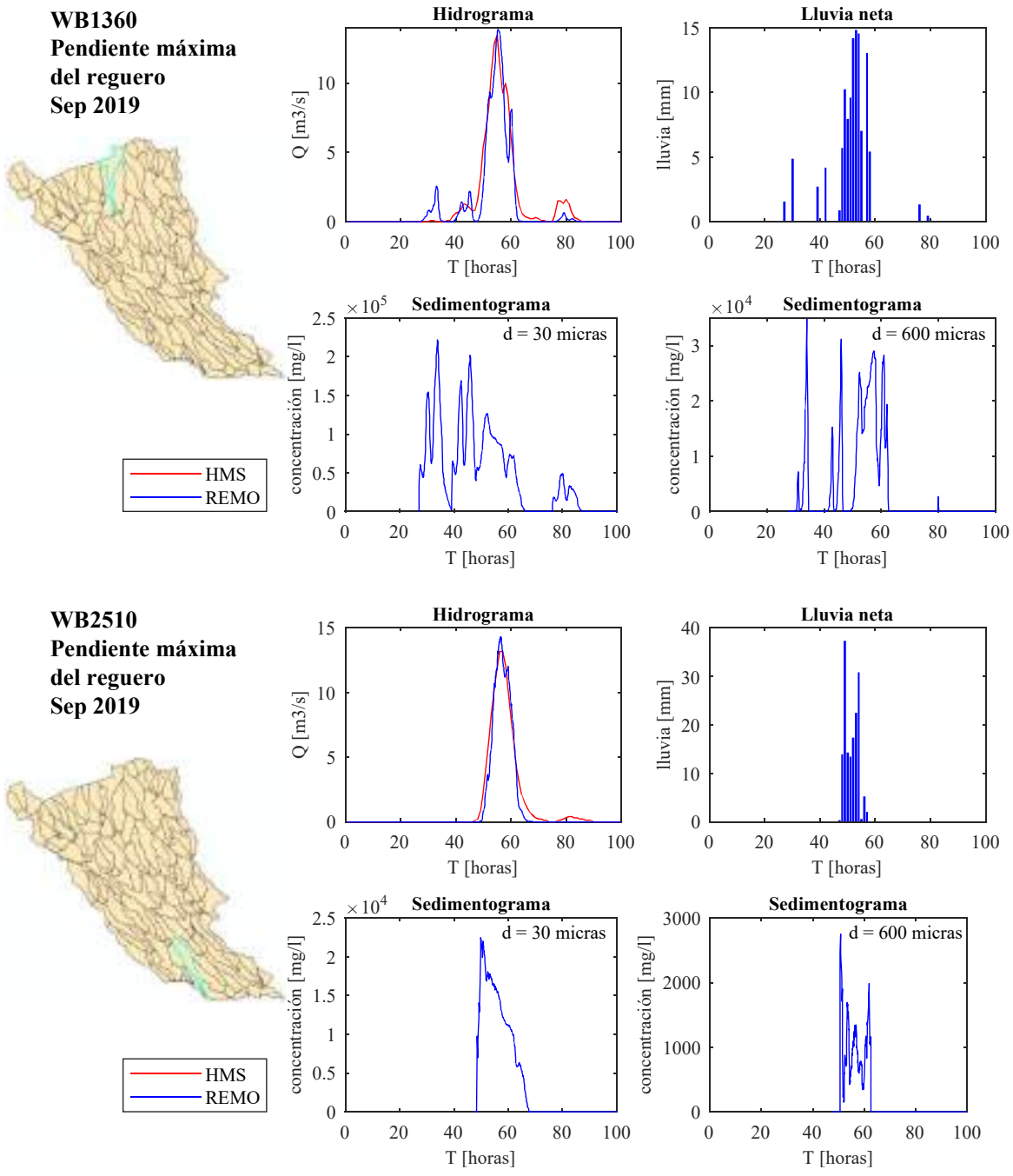


Figura 7. Cuenca de La Maraña, reguero según pendiente máxima.

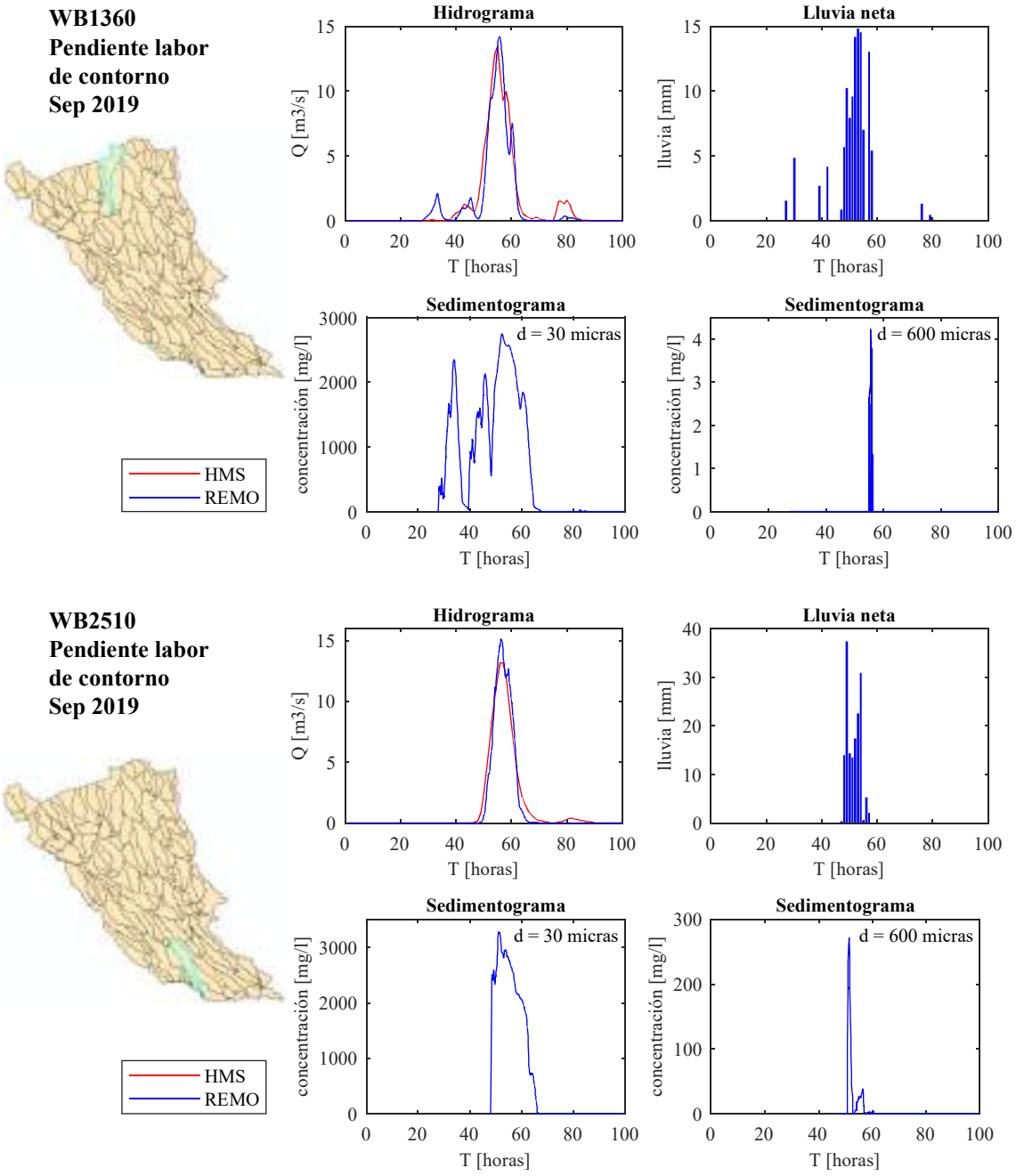


Figura 8. Cuenca de La Maraña, reguero según pendiente labor de contorno.

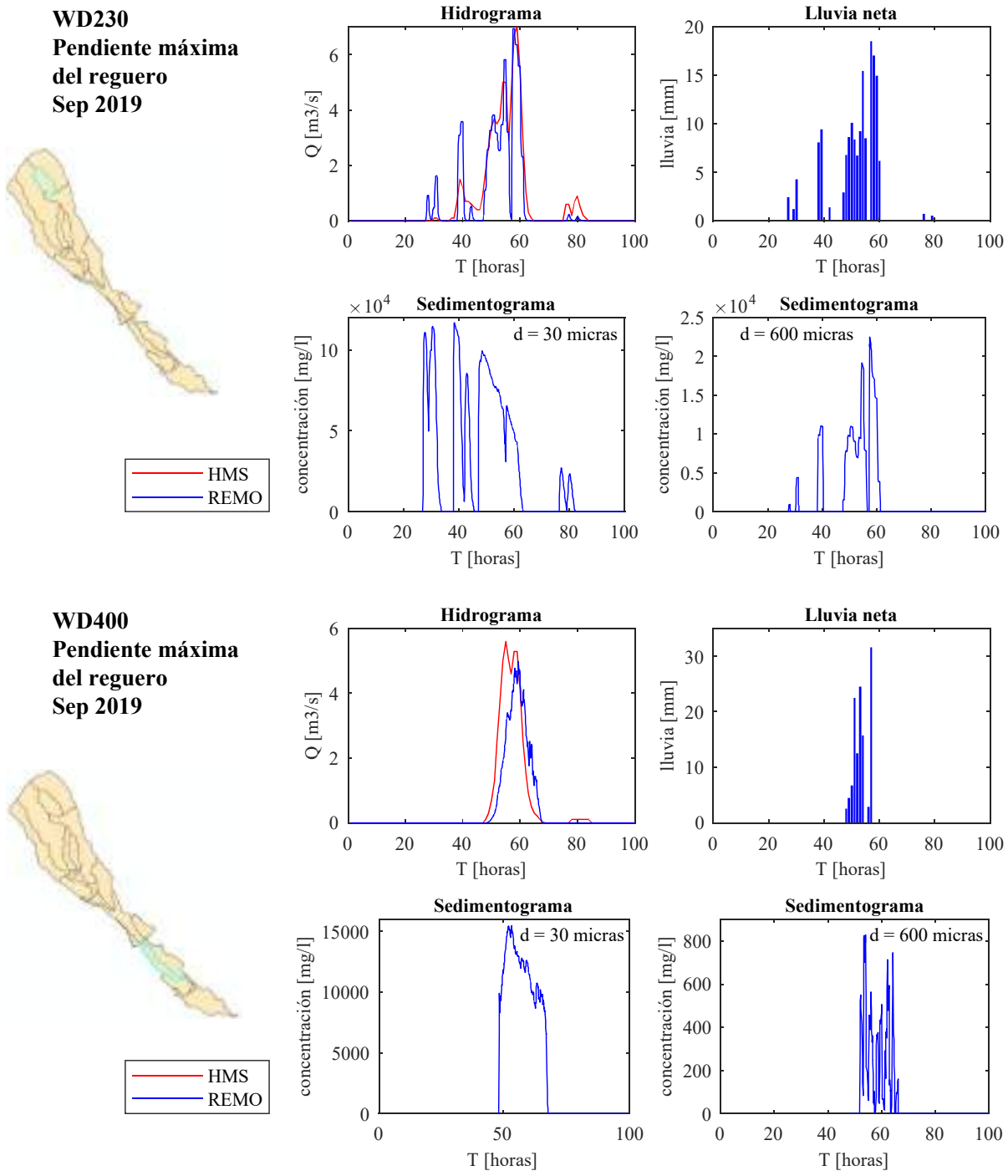


Figura 9. Cuenca de Cobatillas, reguero según pendiente máxima.

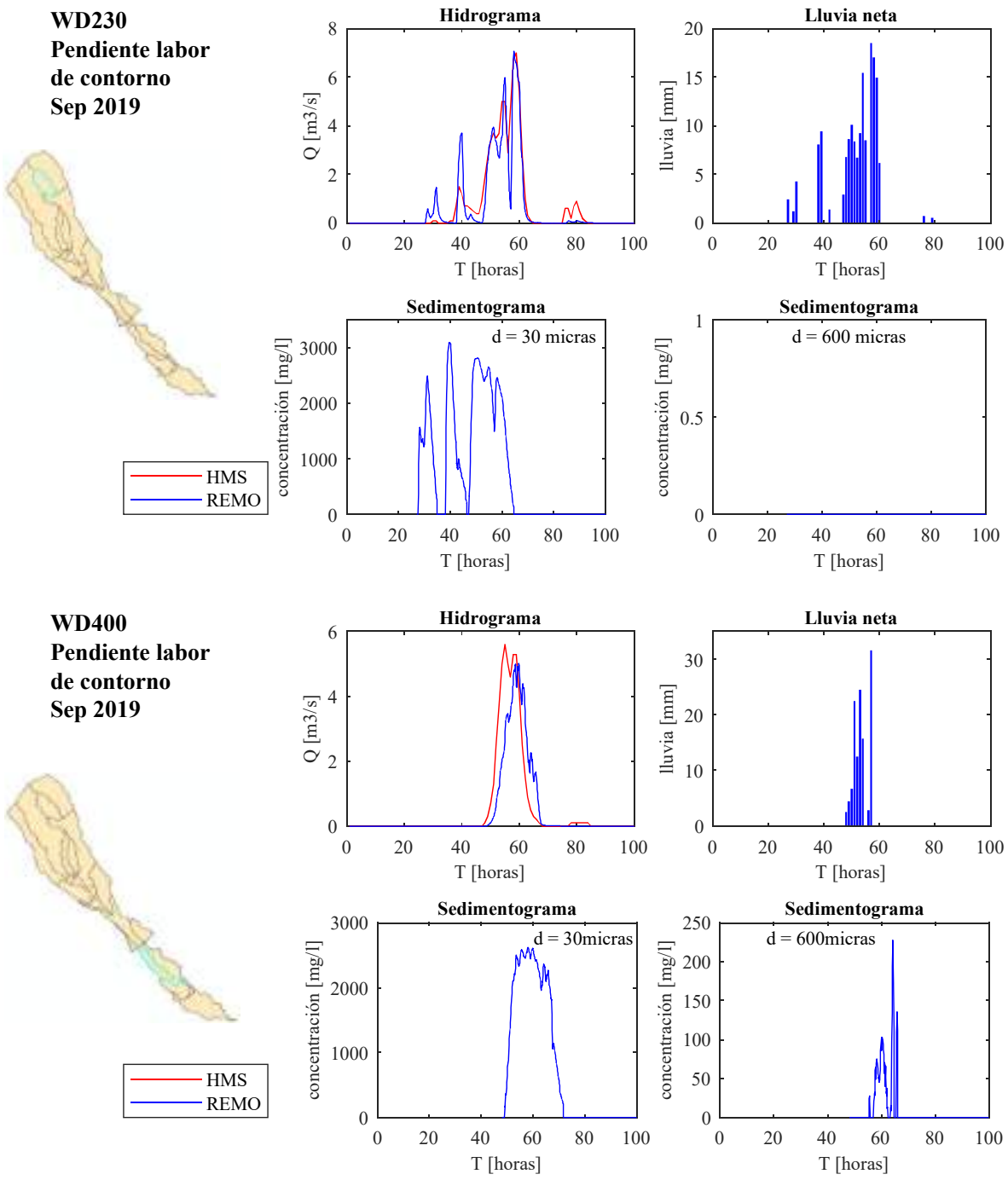


Figura 10. Cuenca de Cobatillas, reguero según pendiente labor de contorno.

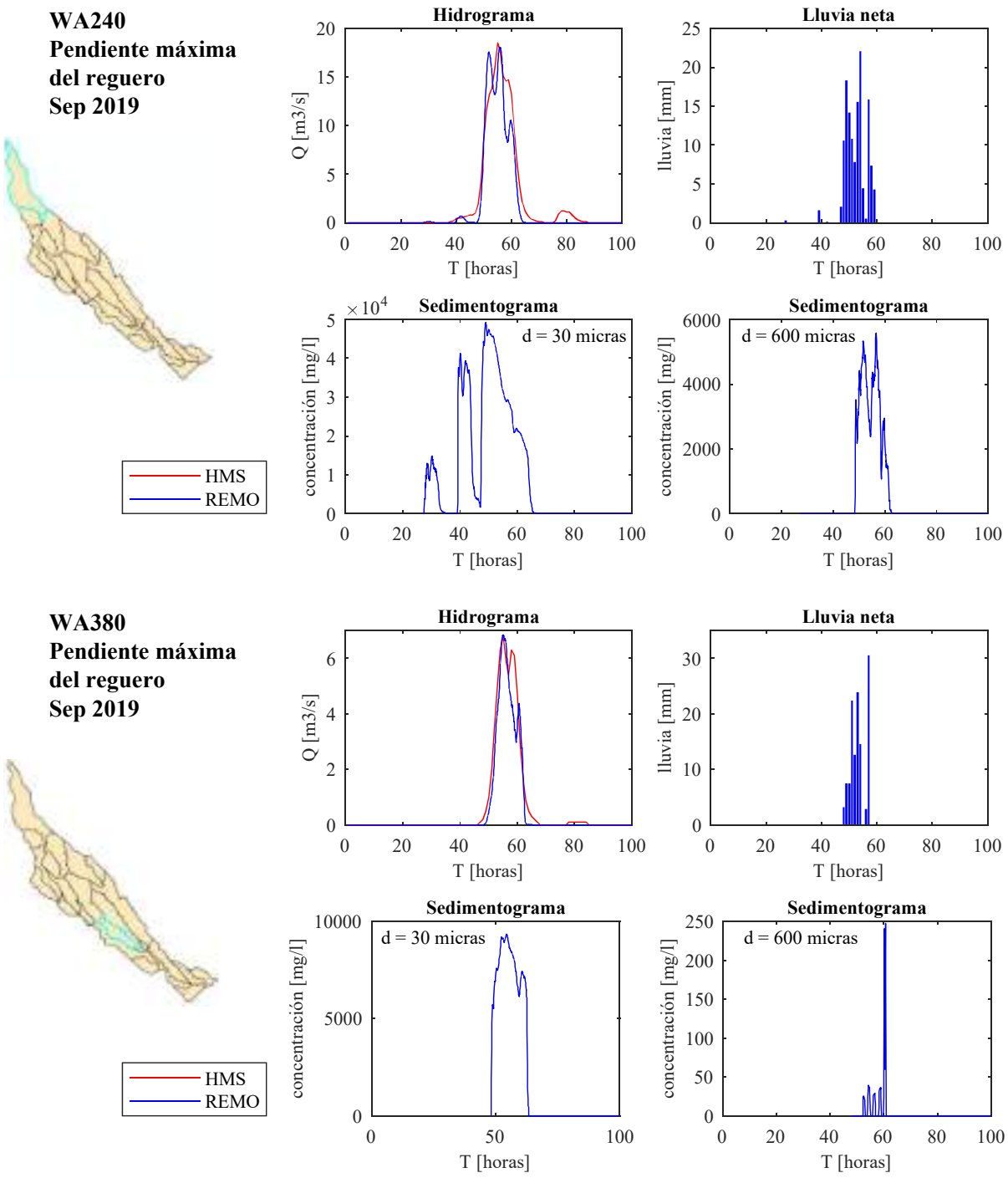


Figura 11. Cuenca de La Peraleja, reguero según pendiente máxima.

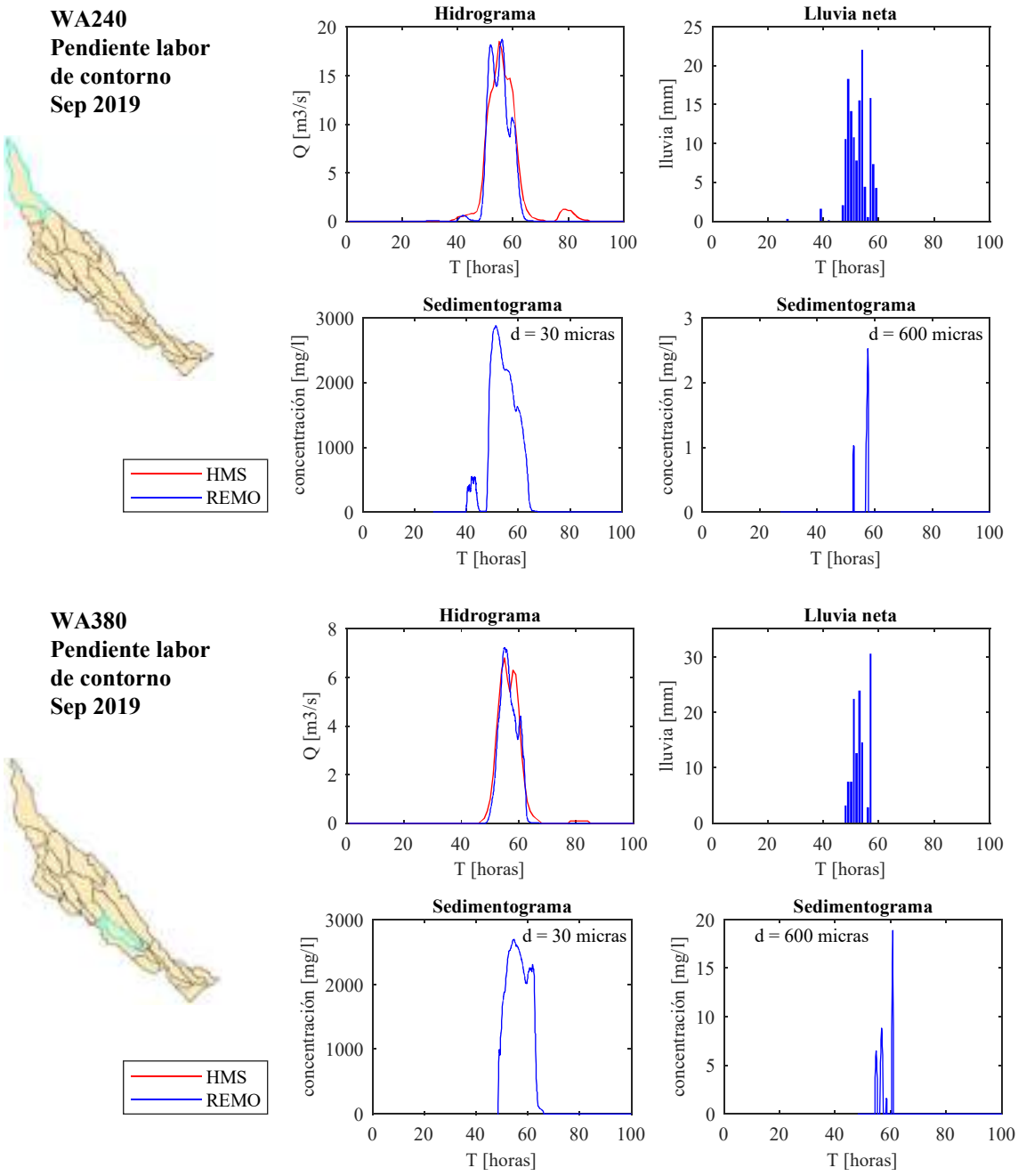


Figura 12. Cuenca de La Peraleja, reguero según pendiente labor de contorno.

Las Tablas 1, 2 y 3 muestran el resumen de los resultados obtenidos para la simulación con REMO y SWAT para la lluvia de septiembre de 2019. En dichas tablas f_c se corresponde con la infiltración mínima del suelo dentro del modelo Horton, la pendiente media de la cuenca *inc_x* es el incremento de longitud de la simulación realizada con REMO, mientras que los valores d_{600} y d_{30} corresponden a los materiales arrastrados para dichos diámetros equivalentes a los d_{50} de las granulometrías consideradas. SWAT únicamente se ha simulado con valores de pendiente máxima, es decir valores del parámetro *P* próximos a la unidad.

Pendiente reguero media

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente (%)	inc_x (m)	f_c (mm/h)	d_{600} (ton/ha)	d_{30} (ton/ha)	REMO (ton/ha)	SWAT (ton/ha)
WB1360	409.64	14.36	20	3.2	17.75	96.51	51.4	56.42
WB2510	299.25	3.23	15	5	1.22	18.47	8.9	8.41

Pendiente labor de contorno

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente (%)	inc_x (m)	f_c (mm/h)	d_{600} (ton/ha)	d_{30} (ton/ha)	REMO (ton/ha)	SWAT (ton/ha)
WB1360	409.64	0.5	20	3.2	0.00	2.30	1.0	-
WB2510	299.25	0.5	15	5	0.03	3.34	1.5	-

Tabla 1. Resumen de valores y resultados de las subcuencas simuladas en la cuenca de La Maraña.

Pendiente reguero media

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente (%)	inc_x (m)	f_c (mm/h)	d_{600} (ton/ha)	d_{30} (ton/ha)	REMO (ton/ha)	SWAT (ton/ha)
WD230	151.24	11.97	15	3	16.88	110.24	57.2	69.0
WD400	145.89	2.99	15	6	0.29	12.20	5.6	5.1

Pendiente labor de contorno

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente (%)	inc_x (m)	f_c (mm/h)	d_{600} (ton/ha)	d_{30} (ton/ha)	REMO (ton/ha)	SWAT (ton/ha)
WD230	151.24	0.5	15	3	0	3.55	1.6	-
WD400	145.89	0.5	15	6	0.04	2.58	1.2	-

Tabla 2. Resumen de valores y resultados de las subcuencas simuladas en la cuenca de Cobatillas.

Para el caso de pendiente máxima, las diferencias entre ambos modelos en los valores de materiales arrastrados están en el orden del 10%. En el caso de la pendiente de cálculo según las líneas de nivel, labor de contorno, los materiales arrastrados calculados a partir de REMO suponen una reducción de la erosión superiores en media al 90%. Esto muestra la gran importancia en cuanto a la reducción de sedimentos arrastrados obtenida una vez se adoptan prácticas agrícolas en las que se asegura que la labor es de contorno. Estos resultados sirven también como calibración entre los modelos REMO y SWAT.

Pendiente reguero media

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente (%)	inc_x (m)	f_c (mm/h)	d_{600} (ton/ha)	d_{30} (ton/ha)	REMO (ton/ha)	SWAT (ton/ha)
WA240	521.32	7.29	20	3	4.01	37.97	18.9	18.47
WA380	172.23	2.53	15	6	0.02	8.45	3.8	3.87

Pendiente labor de contorno

Subcuenca	Superficie (ha)	Pendiente (%)	inc_x (m)	f_c (mm/h)	d_{600} (ton/ha)	d_{30} (ton/ha)	REMO (ton/ha)	SWAT (ton/ha)
WA240	521.31	0.5	20	3	0.00	2.55	1.1	-
WA380	172.22	0.5	15	6	0.00	2.64	1.2	-

Tabla 3. Resumen de valores y resultados de las subcuencas simuladas en la cuenca de La Peraleja.

3.2. Resumen de sedimento emitidos al medio receptor durante el periodo de simulación 2012-2020 con SWAT

En la Tabla 4 se presentan los volúmenes de sedimentos que alcanzan el Mar Menor en el año 2019, así como el promedio anual durante en el periodo de estudio de 2012 a 2020 obtenidos mediante el software SWAT para cada una de las cuencas de estudio. Según los resultados obtenidos, la media de sedimentos anuales entrantes en la laguna es de 0.13 t/(ha/año) en el periodo de 2012 a 2020.

Cuenca	Tasa de sedimentos emitidos al Mar Menor					Tasa de erosión media (t/ha)
	Sed 2019 (t)	Sed 2012-2020 (t/año)	Área (km^2)	Sed 2019 (t/ha)	Sed 2012-2020 (t/ha/año)	
Albujón	4894	2634	207.04	0.236	0.127	15.05
Cobatillas	753	387	39.11	0.193	0.099	28.21
Maraña	9446	3732	217.15	0.435	0.172	21.19
Peraleja	763	378	42.01	0.182	0.090	10.61
Cabezo Gordo	415	189	14.37	0.289	0.131	33.44
San Cayetano	418	198	18.80	0.222	0.105	18.64
San Javier	567	237	25.45	0.223	0.093	10.04
San Pedro	74	41	20.59	0.036	0.020	4.61

Tabla 4. Volúmenes de sedimentos que alcanzan el Mar Menor.

Los valores medios anuales realizados para el periodo de 2012-2020 que se muestran en la Tabla 4 incluyen todas las cuencas consideradas en el software SWAT. Los resultados permiten visualizar cómo, en caso de existir una red de cauces consolidada, únicamente porcentajes en torno al 2% de los sedimentos arrastrados alcanzan el medio receptor. La mayoría de los sedimentos se deposita/sedimenta en las partes bajas de las cuencas, donde los cauces poseen unas pendientes más bajas. Estos resultados muestran la importancia de disponer de una red de cauces consolidada para facilitar la retención de sedimentos en la misma. Es importante hacer constar que, en caso de que

dicha red de cauces sea inexistente, estos resultados alcanzarán porcentajes muy superiores dado que la escorrentía deberá erosionar para generar el cauce cuando éste es inexistente, sobre todo si la escorrentía se produce en suelos agrícolas cultivados.

3.3. Análisis de la sedimentación en tramos de cauce. Caso de la Rambla de Cobatillas

El flujo en los cauces recoge la escorrentía y el caudal sólido de las diversas parcelas y subcuencas. El flujo en canal se simula a su vez mediante el software REMO que calcula la capacidad de transporte que el flujo es capaz de trasegar con las condiciones de caudal entrante calculadas. Analizando la evolución de la pendiente en los cauces se observa que los primeros tramos de cauce, situados aguas arriba, poseen pendientes más elevadas − en el rango del 2-7%; mientras que aguas abajo las pendientes de los cauces se encuentran alrededor de 0.1-1.0%. La Figura 13 muestra el perfil longitudinal en la cuenca Cobatillas donde se observa el cambio de pendiente al llegar a la zona de la subcuenca WD360.

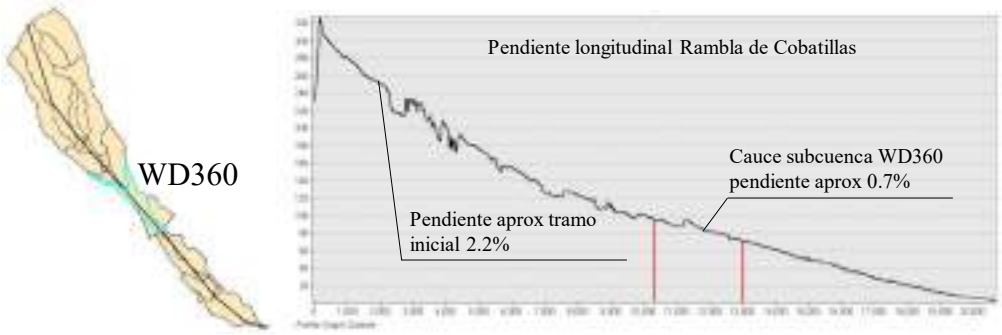


Figura 13. Esquema de la Rambla de Cobatillas y de su perfil longitudinal, así como la ubicación de la subcuenca WD360.

De forma concreta, en la subcuenca WD360 perteneciente a la cuenca Cobatillas se observa como los cálculos realizados por SWAT permiten obtener una carga de sólidos total entrante de aproximadamente 7456 t, mientras que el volumen saliente se reduce a solo 521 t para la lluvia de septiembre de 2019, lo cual supondría un porcentaje de retención en el cauce superior al 90%, debido a la sedimentación. Estos cálculos se han realizado también con el modelo REMO donde los valores de retención de sedimentos mediante sedimentación están en el entorno del 61.5%, quedando retenidos en el cauce alrededor de 4588 t. A la vista de estos valores, y pese a las diferencias obtenidas con ambos modelos, los dos programas constatan la importante capacidad para retener sedimentos por parte de los tramos del cauce. Esto permite confirmar lo anteriormente comentado en referencia a la necesidad de disponer de una red de cauces, no solo para conducir los caudales de escorrentía, sino también como instrumento para retener los sedimentos.

3.4. Sedimentación en embalse de laminación de avenidas en Rambla de Cobatillas

De cara a laminar los caudales de avenida se ha planteado la ubicación de un embalse de laminación en la rambla de Cobatillas. La Tabla 5 resume las principales características de dicho embalse.

Característica del embalse situado en la Rambla de Cobatillas	
Superficie en planta	37.5 ha
Volumen de almacenamiento en el embalse	1.22 hm^3
Cota de fondo del embalse	110 m.s.n.m.
Altura de dique	10 m
Altura de almacenamiento	9 m
Cota de aliviadero	119 m.s.n.m.
Longitud de dique	450 m
Cota del desagüe de fondo	111 m.s.n.m.
Desagües para T_r = 50 años	1x Ø1.0 m
Desagües para T_r = 500 años	3x Ø1.5 m

Tabla 5. Características principales del embalse situado en la Rambla de Cobatillas.

La Figura 14 muestra el porcentaje de sedimentos retenidos en función de su tamaño los caudales líquidos y sólidos generados para la lluvia de periodo de retorno de 50 y 500 años. Los rendimientos de retención son del 77.1% para el periodo de retorno de 50 años, y del 59.8% para el periodo de retorno de 500 años.

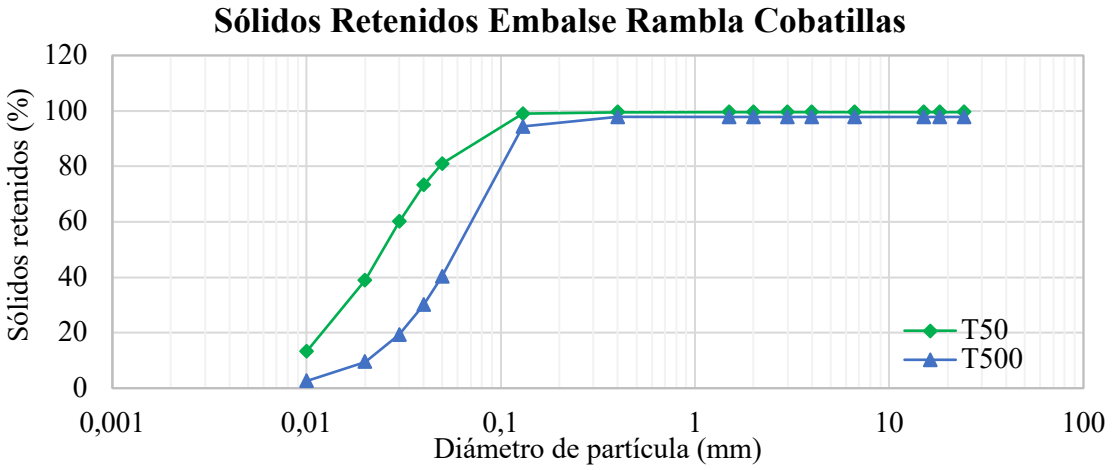


Figura 14. Sólidos retenidos en función de diámetro de partícula en embalse Rambla Cobatillas.

3.5. Simulación de la eficacia de la sedimentación a escala de parcela

Para analizar la eficacia de la sedimentación a nivel de parcela se ha estudiado una parcela de 1 km^2 de superficie, con forma en planta de 1000x1000 m y una pendiente inicial del 3%. La simulación se realiza para la lluvia de septiembre de 2019. Mediante el software REMO se ha obtenido un total de sedimento saliente para dicha lluvia de 2140 t, lo que supone un ratio de 21.4 t/ha. A partir de las ecuaciones de sedimentación presentadas anteriormente se ha simulado el porcentaje de sedimento retenido considerando un embalse asociado a parcela con diferentes superficies (0.5, 1.0, 2.5, 5.0 y 10 ha). Para los cálculos se ha considerado que la cota de fondo del embalse a escala de parcela se encuentra a 0.2 m por debajo de la cota de entrada del flujo. Los porcentajes de retención de sedimentos mediante sedimentación van desde el 43% hasta el 79%. En general se puede observar cómo dichas superficies para sedimentación ofrecen adecuados rendimientos y se comportan de modo

adecuado para la retención de sedimentos, incluso si las superficies reservadas al embalse no son demasiado elevadas. Las siguientes figuras y tablas reflejan los distintos resultados obtenidos.

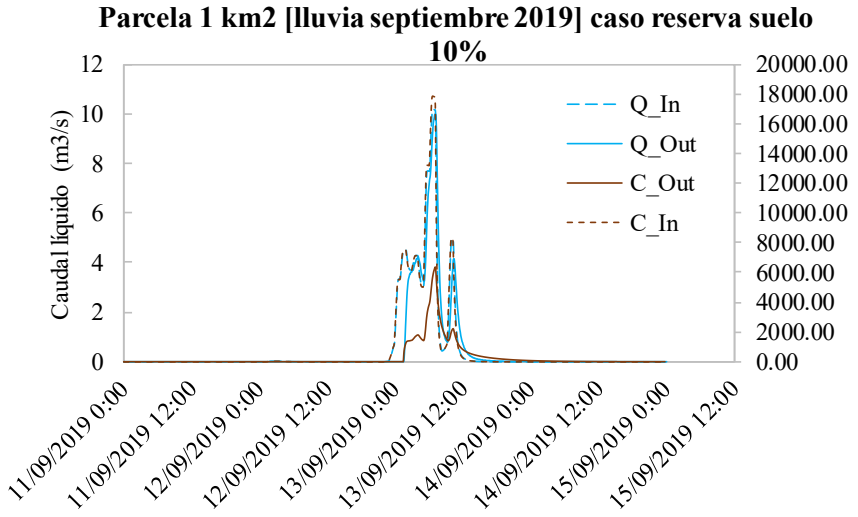


Figura 15. Hidrogramas y sedimentogramas entrantes y salientes en parcela de sedimentación para el caso de reserva de suelo del 10%.

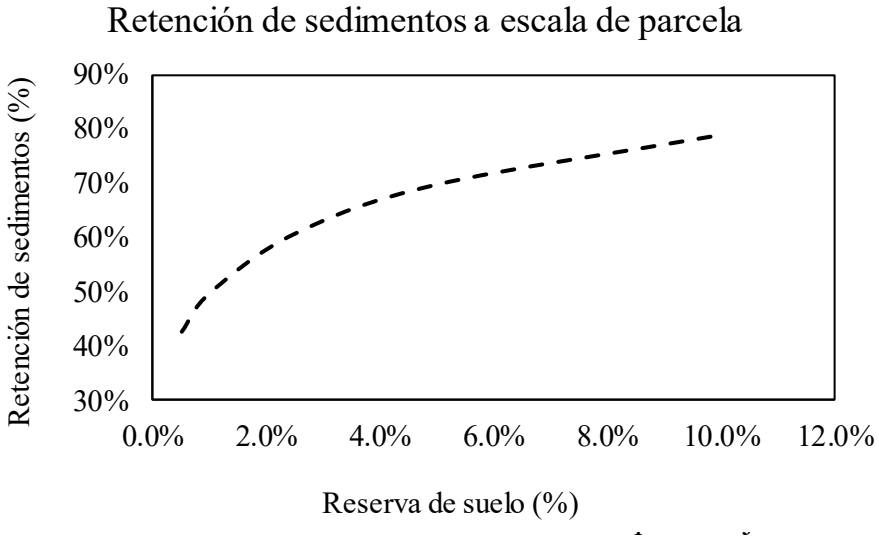


Figura de suelo.

Superficie de parcela (ha)	Pendiente de parcela	Reserva de suelo (%)	Superficie de reserva (ha)	Volumen entrante (t)	Volumen retenido (t)	Retención (%)
100	3%	0.5%	0.5	2140	915	43%
100	3%	1%	1	2140	1068	50%
100	3%	3%	2.5	2140	1301	61%
100	3%	5%	5	2140	1494	70%
100	3%	10%	10	2140	1689	79%

Tabla 6. Retención de sedimentos en embalses a escala de parcela.

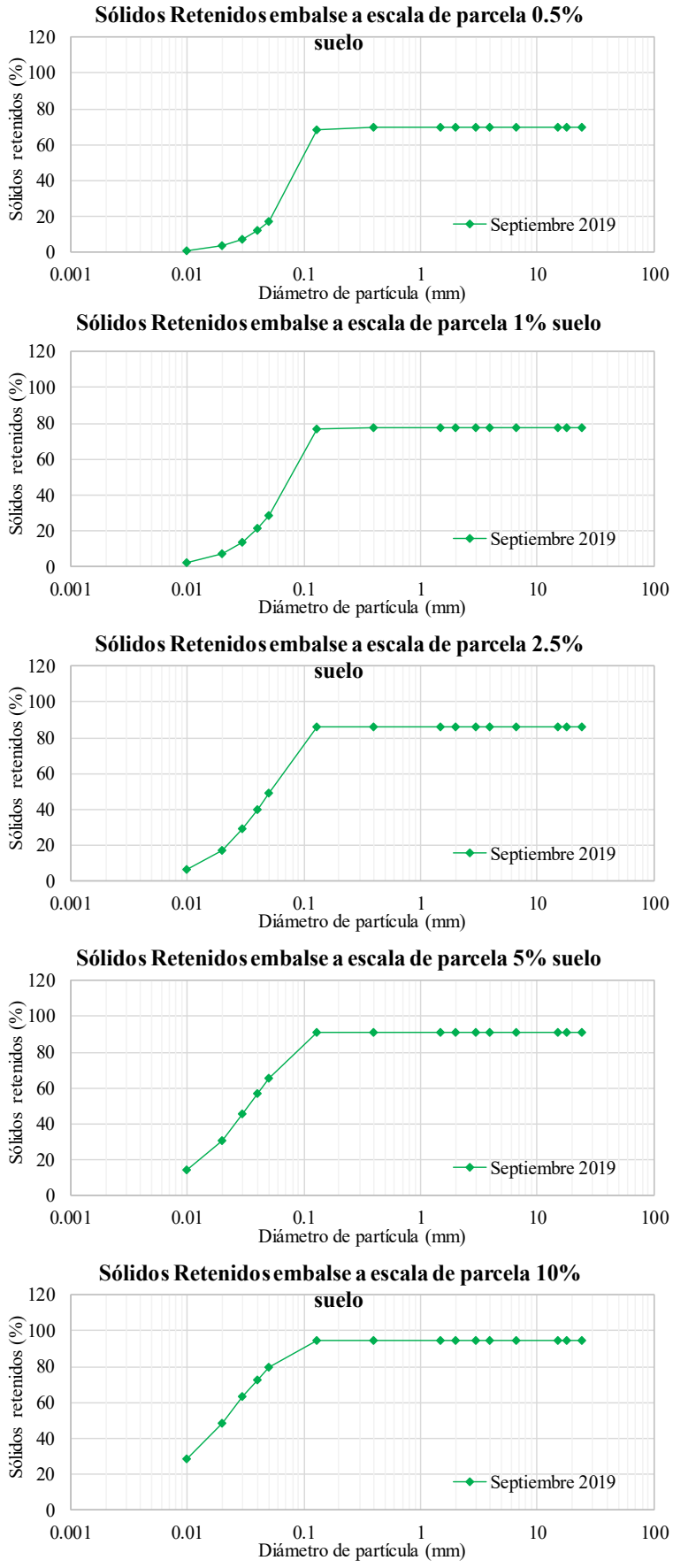


Figura 17. Retención de sedimentos en función de los diámetros de partícula.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo analiza la eficacia de diversas medidas para reducir el arrastre de sedimentos, favorecer la sedimentación de los suelos erosionados, y reducir la pérdida de suelo y el vertido de sedimentos al medio receptor.

Los cálculos se han realizado mediante un software propio basado en una ecuación dinámica tipo Exner a escala de reguero, denominado RillErosionMOdelling (REMO). Este programa ha permitido determinar el tránsito de los sedimentos a escala de parcela y de cauce. Los resultados se han comparado con los valores obtenidos mediante el software SWAT.

A la vista de los resultados de las simulaciones realizadas a partir de diversas variables y a diferentes escalas de cuenca se puede concluir que:

- Las prácticas agrícolas de labor de contorno son fundamentales, con reducciones que alcanzan porcentajes superiores al 90% en cuanto al arrastre de sedimentos a escala de parcela agrícola, si se comparan con prácticas de labor según la pendiente máxima del terreno.
- Es de gran importancia disponer de una red de cauces para conducir los caudales de escorrentía. Dicha red debe servir además como sistema de retención de sedimentos, pudiendo alcanzarse rendimientos de retención de sedimentos vertidos al medio receptor superiores al 98%.
- Los embalses de laminación de avenidas pueden actuar como sistemas para retener sedimentos alcanzando rendimientos superiores al 77% para lluvias de periodo de retorno de 50 años, aunque éstos deben analizarse en conjunto a la red de cauces.
- Los dispositivos de sedimentación a escala de parcela pueden obtener porcentajes de retención de sedimentos superiores al 61.5% para porcentajes del 3% respecto a la superficie de la parcela.

En general, los resultados obtenidos a través del presente trabajo muestran la importancia de una gestión agronómica, así como la de disponer de una red de drenaje y cauces adecuada.

REFERENCIAS

- Agricultural Research Service USDA. (2016). *Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)—Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2: USDA ARS.* http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5971
- Bras, R. L. (1974). *Simulation of the effects of urbanization on catchment response.* Massachusetts Institute of Technology.
- Castillo Elsitdie, L. G. (1996). *El desarrollo sostenible y la economía del cambio tecnológico en la planificación de los recursos hídricos*. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR. Guayaquil, Ecuador.
- Conesa García, C. (1989). *La acción erosiva de las aguas superficiales en el Campo de Cartagena*. CajaMurcia, Murcia.
- Del Bosque González, I., Arozarena Villar, A., Villa Alcázar, G., Valcárcel Sanz, N. & Porcuna Fernández Monasterio, A. (2005). *Creación de un Sistema de Información Geográfico de Ocupación del Suelo en España. Proyecto SIOSE*. Universidad de La Laguna, Tenerife.
- Elliot, W. J., Kohl, K. D. & Laflen, J. M. (1988). *Methods of collecting WEPP soil erodibility data* (N.º 88-138; MCR). American Society of Agricultural Engineering.
- Ferro, V. (1998). Evaluating overland flow sediment transport capacity. *Hydrological Processes*, 12(12), 1895-1910.
- Flanagan, D. C., Gilley, J. E. & Franti, T. G. (2007). Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASABE*,

50(5), 1603-1612.
- López Bermúdez, F. & Romero Díaz, A. (1998). Erosión y desertificación: Implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de Geografía*, 28.
- MAPA (1981). *Proyecto LUCDEME*. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_lucdeme.aspx
- MAPA (2020). *La desertificación en España*. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_espana.aspx
- Meyer, L. D. & Wischmeier, W. H. (1969). Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water. *Transactions of the ASAE*, 12(6).
- Ministerio de Medio Ambiente. (2002). *Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012. Región de Murcia. Murcia. 2002*. EGRAF, Madrid.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Chisci, G., & Torri, D. (1998). The EUROSEM Model. *Modelling Soil Erosion by Water*, 389-398. Springer, Berlin.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009* (N.º 406; Texas Water Resources Institute Technical Report, p. 618). Texas A&M University System.
- Perdek, M., Field, R. & Liao, S. (1998). *Storage / Sedimentation Facilities for Control of Storm and Combined Sewer Overflows: Design Manual* (EPA/600/S-98/004; Environmental Research Brief, p. 8). Environmental protection Agency.
- Romero Díaz, M.A., Ruiz Sinoga, J. D. & Belmonte Serrato, F. (2011). Tasas de erosión hídrica en la región de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 129-153.
- UNEP (1997). *World Atlas of Desertification*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Uribe, N. (2010). *SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Palmira.
- Williams, J. R. (1975). Sediment Routing for Agricultural Watersheds1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 11(5), 965-974.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (N.º 282; Supersedes Agriculture Handbook). U.S. Dept. of Agriculture.

PRECIPITACIONES INTENSAS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA. ANÁLISIS, SISTEMAS DE PREDICCIÓN Y PERSPECTIVAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Jorge Tamayo Carmona
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España
jtamayoc@aemet.es

José Ángel Núñez Mora
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España
jnunezm@aemet.es
https://orcid.org/0000-0002-3455-8892

RESUMEN

En este trabajo se analizan los elementos disponibles en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para caracterizar y predecir los sistemas que dan lugar a las precipitaciones intensas en la Comunidad Valenciana, mostrándose la aplicación de los mismos en el histórico episodio de precipitaciones torrenciales que afectó, entre otras comarcas, a la Vega Baja en septiembre de 2019. También se han analizado las características climáticas de este episodio y su singularidad, comparándolo con otras situaciones históricas que afectaron a la comarca. Finalmente se ha analizado la evolución de diferentes parámetros climáticos y su proyección según los escenarios regionalizados de cambio climático en la Comunidad Valenciana para obtener una perspectiva de la previsible evolución de las características de estos episodios de precipitaciones intensas a lo largo del siglo XXI.

1. SISTEMAS DE PREDICCIÓN Y VIGILANCIA EN AEMET

Una de las principales razones de ser de los Servicios Meteorológicos Nacionales, como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), es llevar a cabo una adecuada vigilancia, predicción y emisión de avisos e información sobre las diferentes situaciones meteorológicas, especialmente las adversas, que permitan a la sociedad disponer de información fiable y oportuna. Esto es sobre todo relevante en el caso de las precipitaciones intensas, que pueden alcanzar una gran severidad, especialmente en el entorno mediterráneo español y que han provocado a lo largo de la historia la pérdida de numerosas vidas e importantes pérdidas económicas.

Existe un consenso científico generalizado sobre el impacto que está sufriendo el sistema climático, siendo la región mediterránea una de las zonas más afectadas por el cambio climático y que se está apreciando de una manera constante en los últimos años, registrándose un notable incremento en la intensidad de los fenómenos meteorológicos asociados a las precipitaciones torrenciales, y en un cambio en los patrones en las mismas, extendiéndose las características otoñales de gran intensidad y focalización espacial a los meses invernales, como ocurrió en los temporales de 2017 y 2020 o de primavera como el de 2019 en la Comunidad Valenciana. Debido a los previsibles efectos del cambio climático, estos fenómenos probablemente van a aumentar en el futuro en la región mediterránea en cuya costa se encuentran las regiones más vulnerables al crecimiento del impacto de las inundaciones, sobre todo debido a inundaciones súbitas provocadas por lluvias torrenciales (MITECO, 2008).

Por todo ello es necesario disponer del personal, equipos e infraestructuras adecuados para poder hacer la mejor vigilancia y predicción posible de las diferentes situaciones que pueden provocar estas precipitaciones torrenciales y tener en cuenta también como se pueden ir modificando sus patrones en el futuro.

Para poder conocer el estado de la atmósfera y a partir de ellos desarrollar la vigilancia y predicción meteorológica, AEMET dispone de diferentes tipos de redes de observación, que permiten medir in situ mediante instrumentos convencionales o a distancia, a través sistemas de teledetección terrestre, así como acceso a la información proporcionada por los satélites meteorológicos.

La red de observación convencional de AEMET está compuesta por las estaciones meteorológicas de superficie, con 814 estaciones meteorológicas automáticas que pueden registrar datos de un gran número de parámetros cada 10', y la red de observación en altura, cuyos datos de perfiles verticales de la atmósfera son asimilados por los modelos numéricos de predicción y que son esenciales para asegurar su calidad. Además, se utilizan los datos de otras redes de observación terrestre con información fiable, como son las correspondientes a la red de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) de las Confederaciones Hidrográficas. Esta colaboración permite incrementar notablemente la densidad de las redes de observación compartiendo recursos entre instituciones.

Los sistemas de teledetección terrestre de AEMET están compuestos por la red de radares meteorológicos compuesta por 15 sistemas regionales que permiten disponer de una cobertura total del territorio, pudiendo disponer también, además de la información regional, mosaicos de composición nacional, y la red de detección de rayos, compuesta por 20 equipos detectores de descargas, que además comparte información con los equipos instalados en Portugal y Francia, lo que permite aumentar la capacidad de detección y localización de los rayos. Estos sistemas, junto con la información proporcionada por los satélites meteorológicos, especialmente los de la serie METEOSAT, son fundamentales para la vigilancia y predicción inmediata y a muy corto plazo, sobre todo cuando se combinan todas estas fuentes de información en las estaciones de trabajo meteorológicas de las que dispone AEMET.

La herramienta fundamental para las predicciones a corto y medio plazo son los modelos de predicción numérica del tiempo. En AEMET se utilizan algunos de los modelos de mayor calidad existentes, tanto en su versión determinista como probabilística. Se utilizan tanto modelos globales, como el Modelo del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM), institución de la que España es socio, como de alta resolución, como el HARMONIE-AROME, modelo mesoescalar no hidrostático que actualmente se está utilizando con una resolución horizontal de 2,5 km y 65 niveles en la vertical, desarrollado por un consorcio europeo del que forma parte AEMET. Para poder procesar y disponer puntualmente de la información proporcionada por los modelos, AEMET dispone de uno de los ordenadores más potentes de España, con una potencia de cálculo de hasta 168 Teraflops.

Aunque el elemento más importante en todo este sistema destinado a la predicción y vigilancia meteorológica es el capital humano del que dispone AEMET. Los predictores son esenciales para poder utilizar toda esta tecnología, aplicar modelos conceptuales que permitan elaborar los productos demandados por la sociedad y los responsables de la Protección Civil y hacer un análisis crítico de la información disponible. Esto es especialmente importante a la hora de evaluar la información suministrada por los modelos numéricos de predicción y determinar su consistencia con la situación que realmente se está produciendo, ya que en ocasiones y especialmente para predicciones de escala reducida su variabilidad puede ser alta, como puede apreciarse en la Figura 1, correspondiente al temporal de septiembre de 2019 que afectó sobre todo a la Comunidad Valenciana y Región de

Murcia, en la que estaba prevista la formación de un Medicane en el sur del Golfo de Valencia que finalmente no llegó a concretarse.

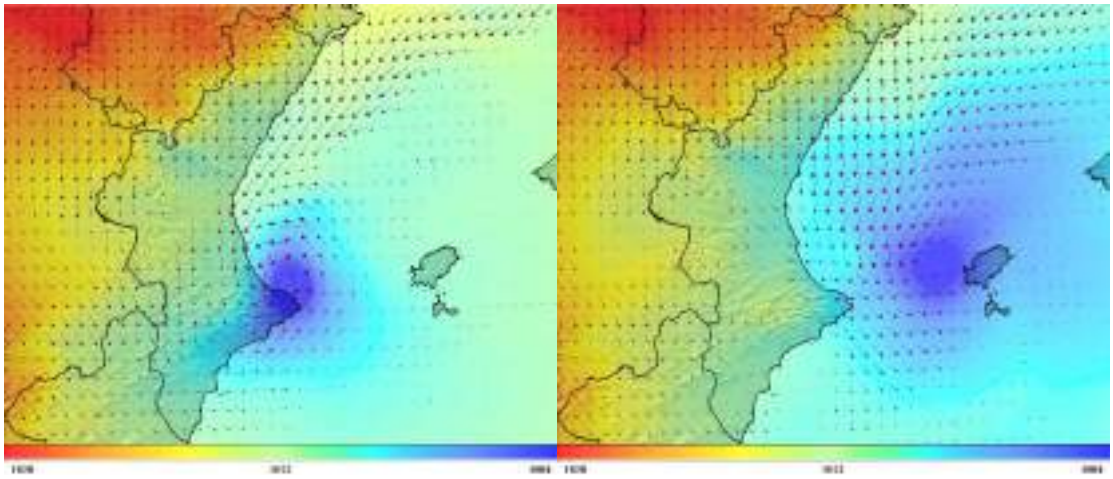


Figura 1. Diferencia entre la predicción de viento y presión al nivel del mar H+18 (izquierda) y el análisis (derecha) para el 11 de septiembre de 2019 a las 06UTC.

Por ello, AEMET dispone de once unidades especializadas en la predicción operativa, los Grupos de Predicción y Vigilancia que junto con el Centro Nacional de Predicción conforman el Sistema Nacional de Predicción, que lleva a cabo la vigilancia y predicción de los diferentes episodios meteorológicos que afectan a España, estando especializados tanto en el tipo de productos a realizar (avisos meteorológicos, meteorología aeronáutica, meteorología marítima, meteorología de montaña) como en su distribución regional.

Finalmente, para poder caracterizar a las diferentes situaciones, analizar sus singularidades y comparar con las condiciones climáticas, AEMET gestiona el Banco Nacional de Datos Climatológicos, en el que se almacenan las series históricas de las observaciones climatológicas realizadas en las estaciones de las redes principal (atendidas por personal de AEMET) y secundaria (atendida por colaboradores voluntarios) de España, una vez depuradas y controladas en su calidad, algunas con más de 150 años de antigüedad.

2. APLICACIÓN AL EPISODIO DEL 11 AL 14 DE SEPTIEMBRE DE 2019

Entre el 11 y 14 de septiembre de 2019 se produjo un episodio de precipitaciones torrenciales (Figura 2) que afectó a la Comunidad Valenciana y de la Región de Murcia y que llegaron a ser históricas y catastróficas en comarcas como la Vega Baja del Segura en Alicante, con cantidades que llegaron a los superar los 500 mm en Orihuela y los 300 mm en otras localidades del norte de Alicante, de la Vega Baja y otras zonas de la Vall de Albaida

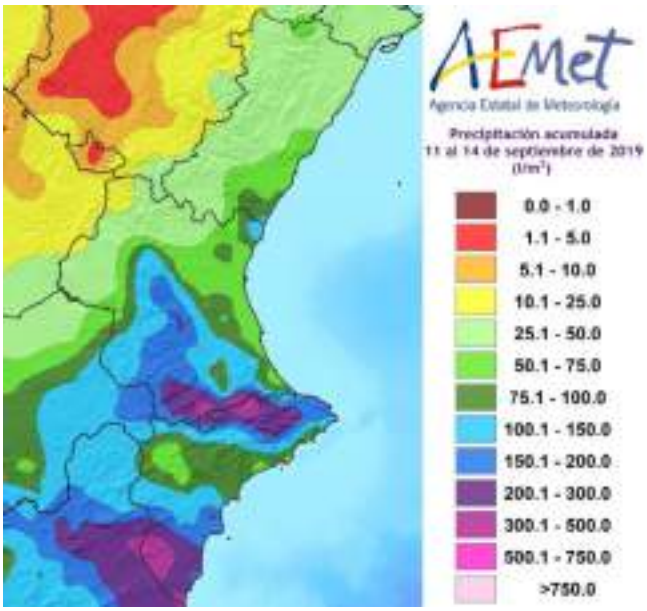


Figura 2. Precipitación acumulada entre el 11 y 14 de septiembre de 2019.

2.1. Descripción de la situación

Los modelos de predicción meteorológica mostraron cómo a partir de las últimas horas del día 9 estaba previsto el desplazamiento de una DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) a lo largo del día 10 de septiembre de norte a sur por el este de la Península y permaneciendo estacionaria entre el sureste peninsular y el norte de África durante los días siguientes hasta el día 13 (Figura 3).

En capas bajas se observó un intenso flujo de viento húmedo e inestable del este que, además de contribuir de manera importante al desarrollo de las precipitaciones que llegaron a alcanzar intensidad torrencial, generó un importante temporal de levante, con intervalos de viento del nordeste fuerza 8 y mar muy gruesa, con olas que superaron los 4 metros.

El desplazamiento de la baja en altura de norte a sur a partir del día 11 y de sur a norte a partir del 13, junto con el de un chorro de viento de componente este en capas bajas de norte a sur el día 12, fueron los elementos rectores de los sistemas convectivos que se desarrollaron y que focalizaron las precipitaciones en el sur de la provincia de Valencia, en la de Alicante y en la Región de Murcia.

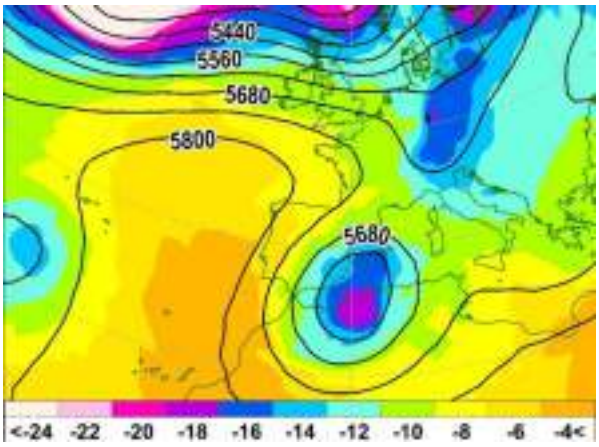


Figura 3. Altura geopotencial y temperatura en la superficie isobárica de 500 hPa. Día 11 de septiembre de 2019 a las 12 UTC.

Un último elemento que siempre está presente en los temporales de levante es la subida del nivel del mar a causa del tránsito de sistemas de bajas presiones. Los mareógrafos de Puertos del Estado llegaron a registrar ascensos de casi medio metro en aguas costeras de la provincia de Alicante.

Hay que señalar que la circulación de una DANA tan profunda por el sur de la Península en una fecha tan temprana del otoño climatológico, en la primera mitad de septiembre, es un hecho extremadamente anómalo, como puede comprobarse en la Figura 4, en la que se representan los valores medios de la altura del geopotencial de 300 HPa frente a los valores registrados en la estación de radiosondeo de Murcia.

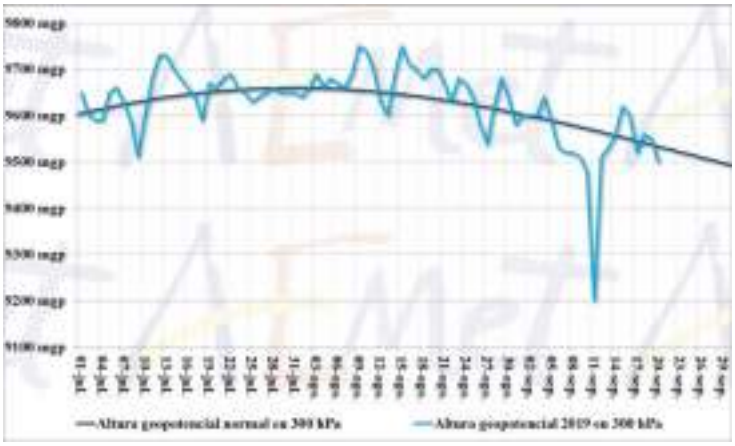


Figura 4. Altura geopotencial en 300 hPa frente a los valores normales en Murcia.
1 de julio al 20 de septiembre de 2019.

2.2. Sistemas de vigilancia

Una vez establecido el marco de la predicción a partir de la información proporcionada sobre todo por los modelos numéricos de predicción meteorológica, se hace necesario vigilar en que zonas se empiezan a desarrollar las precipitaciones más intensas, estimando también su evolución en el muy corto plazo.

Para poder estimar las zonas en las que se puede focalizar la precipitación más intensa es fundamental el uso combinado de los sistemas de teledetección que, junto al uso de modelos conceptuales asociados a este tipo de situaciones por parte de los predictores, permiten anticipar las áreas que pueden estar más afectadas.

Las imágenes del radar meteorológico de AEMET situado en la Sierra de la Pila (Murcia), junto con los datos proporcionados por la red de detección de rayos, mostraban las zonas en las que se focalizaba la convección y donde alcanzaba una mayor intensidad. En la Figura 5 se presenta la información combinada del radar y de la red de detección de rayos en dos momentos diferentes del episodio, en los que se puede apreciar la organización de los mismos.

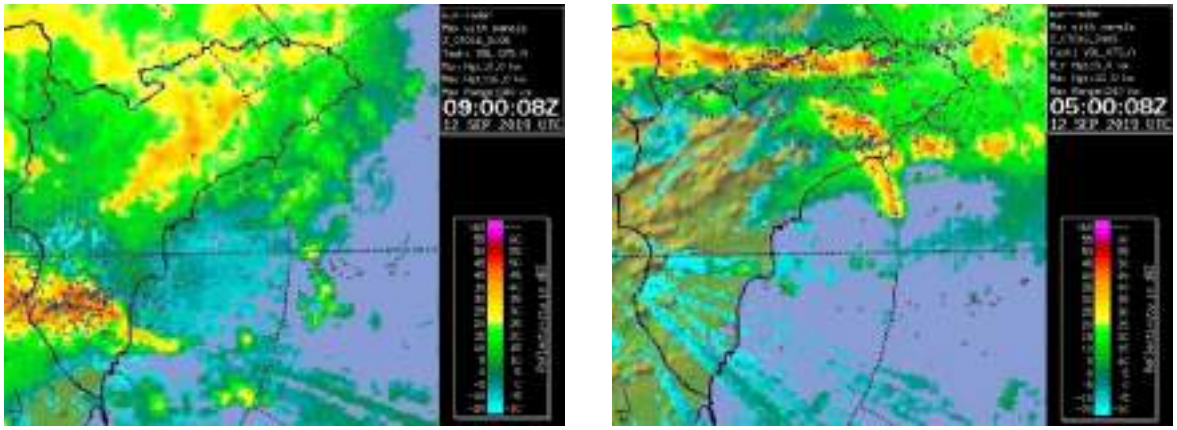


Figura 5. Imagen de radar y rayos registrados a las 05:00 UTC y 09:00 UTC el 12 de septiembre de 2019.

La precipitación que finalmente se registra en superficie, junto con la intensidad de la misma se puede seguir a partir de los datos proporcionados por la red de estaciones automáticas de superficie. El carácter torrencial de las precipitaciones puede apreciarse en el hietograma de las precipitaciones registradas durante el episodio en la estación del SAIH del Segura en Orihuela (Figura 6), en el que las intensidades llegaron a superar los 106 mm/h (a partir de 60 mm/h AEMET considera que una precipitación tiene carácter torrencial).

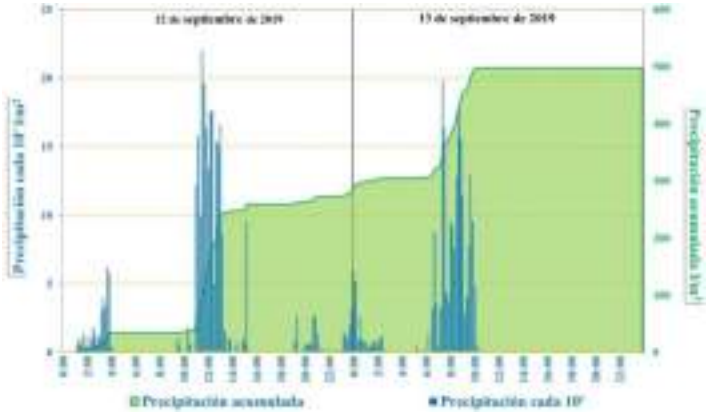


Figura 6. Banda de precipitación de la estación meteorológica de Orihuela de la Confederación Hidrográfica del Segura de los días 12 y 13 de septiembre de 2019.

El seguimiento de toda esta información y la aplicación de los modelos conceptuales aplicables a este tipo de situaciones mediterráneas son utilizados por los predictores para poder ir estableciendo en cada momento las zonas que previsiblemente se van a ver afectadas por las precipitaciones, estableciendo su probable intensidad y evolución espacial y temporal.

3. ANÁLISIS DE LA ANOMALÍA CLIMÁTICA

El conocimiento de las características de este tipo de episodios es fundamental a la hora de establecer los modelos conceptuales que lleven a su adecuada predicción, por lo que una vez ocurridos, se analizan aquellas, especialmente si, como es el caso, la situación de ha tenido un carácter excepcional, tanto en su fecha de ocurrencia como en la intensidad de la misma.

A la hora de realizar el análisis climático de la precipitación registrada durante este episodio en la comarca de la Vega Baja y en el resto de la cuenca del Segura, comparando los datos de septiembre de 2019 con el resto de la serie histórica, se han generado todas las rejillas de precipitación desde 1950 hasta 2019 en las zonas presentadas en la Figura 7. Estos datos permitirán calcular los valores medios de la precipitación acumulada durante el episodio y el de la precipitación máxima en 24 horas en cada una de las tres superficies de estudio, además de poder explorar tendencias en las últimas siete décadas.

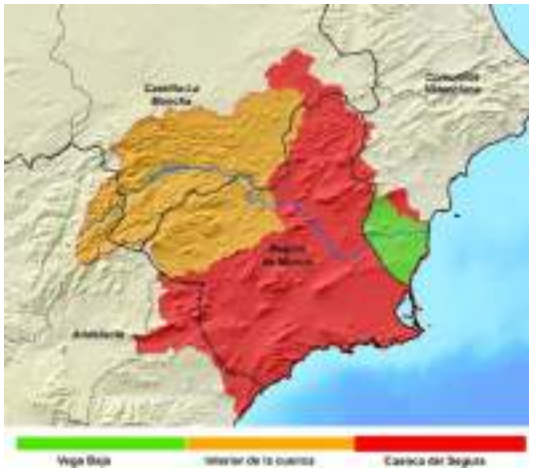


Figura 7. Zonas de trabajo para el cálculo de la precipitación media mensual y máxima en 24 horas en tres superficies: Vega Baja alicantina (en verde), interior de la cuenca (en naranja) y cuenca del Segura (contorno en rojo).

El trabajo con datos en rejilla resulta más robusto que el trabajo con datos puntuales, sobre todo cuando se trata de analizar la precipitación en un área más o menos extensa. Además, cuando se trata de describir fenómenos meteorológicos extremos que presentan un periodo de retorno de décadas, hay dificultades para obtener series largas y homogéneas de un observatorio.

La precipitación total mensual ha sido la base para identificar los episodios que más precipitación han acumulado en las zonas de estudio, ya que, dentro de un mismo mes, cuando se produce un episodio de lluvia torrencial en la cuenca del Segura, éste suele ser único, aunque a veces pueda presentarse en varias fases.

La precipitación máxima en 24 horas se refiere al máximo acumulado en el denominado día pluviométrico, entre las 07 UTC de un día y las 07 UTC del día siguiente.

Una vez obtenidos los datos se han calculado las rejillas aplicando una técnica de interpolación de *kriging* ordinario, obteniendo a partir de ellas los promedios de precipitación acumulada en cada episodio y máxima en 24 h en cada una de las tres zonas consideradas, presentados respectivamente en la Tabla 1 y Tabla 2. Se han ordenado los datos jerárquicamente, tomando como referencia los 10 episodios más intensos en cada uno de los dos casos en la Vega Baja.

Mes	Cuenca del Segura		Interior		Vega Baja		Duración del episodio (días)
	Precipitación episodio	Jerarquía	Precipitación episodio	Jerarquía	Precipitación episodio	Jerarquía	
sep-19	163.3	2	147.7	6	267.0	1	3
sep-89	148.3	5	134.5	14	232.2	2	4
nov-87	118.2	13	131.5	17	193.0	3	6
sep-09	99.8	23	55.6	214	174.7	4	4
dic-16	173.6	1	162.4	2	174.7	5	5
oct-72	122.1	10	105.4	50	170.6	6	4
oct-86	149.4	4	143.2	8	158.9	7	15
ene-91	80.5	50	45.8	290	135.5	8	6
oct-69	153.9	3	127.2	19	129.2	9	7
abr-19	125.2	8	145.6	7	121.4	10	5

Tabla 1. Precipitación en el episodio y jerarquía en la cuenca del Segura, zona interior y Vega Baja (ordenación de mayor a menor acumulado en la comarca de la Vega Baja).

En cuanto a la precipitación acumulada en episodios (Tabla 1), el registro en la Vega Baja en el mes de septiembre de 2019 es el más alto de la serie, con un promedio comarcal de precipitación de 267.0 l/m^2, lo que supone un 15% más de precipitación que durante el mes de septiembre de 1989, que es el segundo en la lista ordenada de máxima precipitación mensual en dicha comarca. En la cuenca del Segura y en el interior, los meses de más precipitación acumulada fueron diciembre de 2016 y diciembre de 2009, respectivamente, dos meses invernales, siendo septiembre de 2019 el segundo en precipitación acumulada dentro de la jerarquía de datos de la serie de la cuenca del Segura y el sexto en jerarquía en la zona de interior.

De acuerdo con la recopilación histórica de inundaciones y precipitaciones extremas que la Confederación Hidrográfica del Segura presenta en su página web (*Cronología de Riadas En La Cuenca Del Segura*), los diez episodios de la Tabla 1 causaron inundaciones o riadas en la cuenca, salvo el de enero de 1991 que no aparece en la citada cronología.

Resulta muy significativo que, de los cuatro meses con mayor precipitación acumulada en la comarca alicantina de la Vega Baja, tres se hayan producido en un mes de septiembre, mientras que en el interior y conjunto de la cuenca los máximos se han registrado en un mes invernal.

Mes	Cuenca del Segura		Interior		Vega Baja	
	Precipitación máxima en 24 h	Jerarquía	Precipitación máxima en 24 h	Jerarquía	Precipitación máxima en 24 h	Jerarquía
sep-19	108.7	1	94.7	1	198.7	1
nov-87	63.8	6	49.3	22	178.7	2
sep-89	80.1	2	63.6	3	150.3	3
feb-85	42.8	29	36.9	54	102.9	4
sep-09	38.0	43	17.6	347	95.1	5
dic-16	66.7	4	51.3	17	90.5	6
abr-04	55.0	12	56.9	7	89.3	7
oct-72	48.2	14	33.6	76	77.2	8
abr-19	65.5	5	59.9	5	71.3	9
dic-54	43.6	26	24.7	183	69.1	10

Tabla 2. Precipitación máxima en 24 horas y jerarquía en la cuenca del Segura, zona interior y Vega Baja (ordenación de mayor a menor acumulado en la comarca de la Vega Baja).

En cuanto a la precipitación máxima en 24 horas (Tabla 2), el acumulado más alto en las tres zonas se registró en el temporal de septiembre de 2019, durante el día pluviométrico 12 (entre las 07 UTC del día 12 de septiembre de 2019 y las 07 UTC del día 13), lo que da idea de la excepcionalidad de este temporal en cuanto a su intensidad.

La principal diferencia entre los temporales de otoño e invierno en la zona viene dada por la mayor duración de los episodios en el segundo caso, lo que puede provocar un mayor volumen de precipitación en el conjunto del temporal, mientras que, en los primeros, la principal característica es la torrencialidad y corta duración de los mismos, dando lugar a los mayores registros acumulados en 24 h.

En un temporal en septiembre hay más energía en juego, por lo que la precipitación acumulada en 24 horas en los episodios más adversos, como los de septiembre de 2019, 1989 o 2009, es muy alta en todas las zonas de estudio, tanto de litoral como de interior, llegando a ser el máximo absoluto en episodios excepcionales como el de 2019.

4. CAMBIOS EN ELEMENTOS DEL CLIMA OBSERVADO EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS

En las últimas décadas se venido observando un cambio en los elementos del clima que forman las condiciones de contorno adecuadas bajo las cuales se desarrollan las precipitaciones torrenciales. Además del indudable incremento de la temperatura del aire documentado en numerosas publicaciones científicas e informes del IPCC, se ha producido un incremento de la temperatura superficial del mar. Estos dos factores han dado lugar a una mayor evaporación, que está fuertemente relacionada con la mayor disponibilidad de agua total en la columna atmosférica en verano y al principio del otoño, lo cual finalmente puede conducir a una mayor intensidad en las precipitaciones.

Del análisis de la temperatura del aire calculada a partir de los datos de observación presentes en el banco de datos climatológico nacional de AEMET y generando las rejillas correspondientes aplicando técnicas geoestadísticas, se aprecia como la serie de temperatura media anual calculada para el promedio de la superficie de la Comunidad Valenciana ha ascendido 1.1 ºC desde 1950 (Figura 8), siendo más acusado en verano (+1.3 ºC), que en otoño (+0,8 ºC) e invierno (+0.9 ºC).

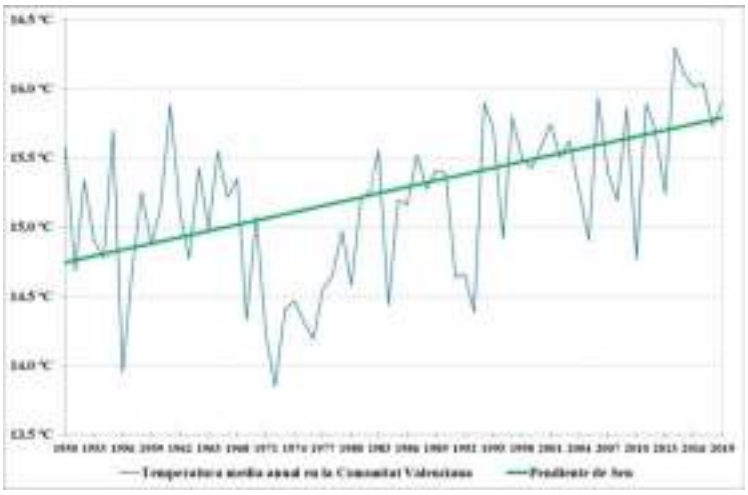


Figura 8. Variación de la temperatura media anual en la Comunidad Valenciana.

En cuanto a la temperatura de la superficie del mar, a partir de los reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020) hay una tendencia estadísticamente significativa de que la temperatura del Mediterráneo occidental ha ascendido 0.98 ºC en promedio anual, siendo este mucho más acusado, como ocurre con la temperatura del aire, en verano, con un promedio trimestral de +1.60 ºC, con zonas próximas a las Islas Baleares en las que se superan los 2 ºC de ascenso (Figura 9).

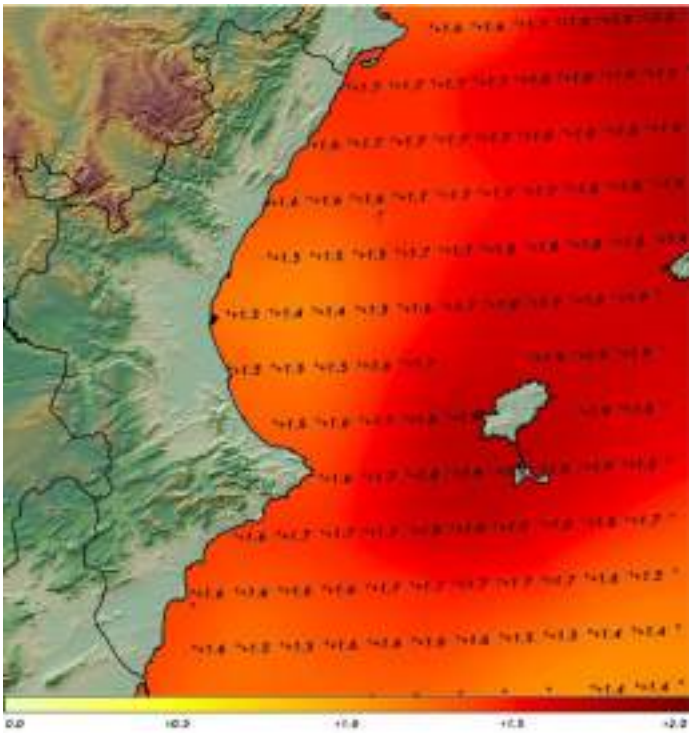


Figura 9. Variación de la temperatura superficial del mar en el verano climático (junio, julio y agosto). 1979-2019. Fuente de datos para la elaboración del mapa: ERA5. Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S).

Frente al litoral de Comunidad Valenciana, el incremento de temperatura en las últimas cuatro décadas oscila alrededor de +1.6, de forma que durante la segunda mitad del mes de agosto la temperatura superficial media de los últimos años se sitúa en valores próximos a 27 ºC.

El calentamiento del aire y del mar observado en las últimas décadas está muy relacionado con variaciones de ciertos componentes del ciclo hidrológico y de los sistemas hidrológicos, entre ellos el aumento de la evaporación y el aumento del vapor de agua atmosférico (Bates et al., 2008) y, consecuentemente, un mayor poder de liberación de calor latente cuando se desarrollan los fenómenos convectivos presentes en situaciones de lluvias torrenciales otoñales.

Coherente con el calentamiento observado, que ha sido más intenso en los meses de verano, en las últimas décadas se ha producido un incremento de la evaporación en esta estación. Gran parte de este flujo de humedad desde la superficie hacia la atmósfera se traduce en un notable incremento del total de agua en columna sobre la superficie del Mediterráneo occidental. A partir del procesado de los datos ERA5 del servicio de Cambio Climático de Copernicus, se aprecia que, en promedio, el incremento de vapor en columna en el mes de agosto, antes por tanto de la época más favorable para que se produzcan precipitaciones torrenciales en la zona, es de 2.1 kg/m^2 sobre una media climática en este mes de 29.0 kg/m^2 lo que supone que el incremento del total de agua en columna frente a la costa de Alicante es del 11.4% en el promedio del mes (Figura 10).

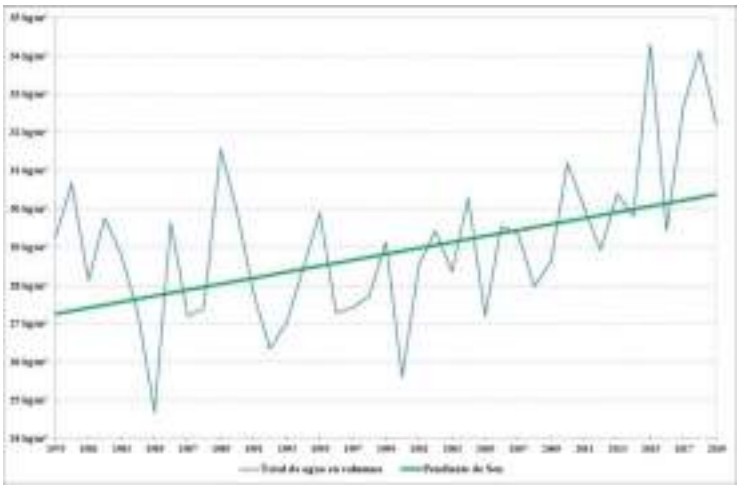


Figura 10. Total de agua en columna y pendiente de Sen. Promedio del mes de agosto frente a la costa de la Vega Baja, en el punto de coordenadas 0º30'W, 38º00'N. Fuente de datos para la elaboración del gráfico: ERA5. Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S).

Estas variaciones, conducentes a una mayor energía y vapor de agua disponible en la atmósfera, pueden dar lugar a que las precipitaciones torrenciales sean más intensas y con mayores volúmenes de precipitación. En el análisis mostrado en el apartado 3 se pone de manifiesto esta tendencia, ya que, de los 10 días con más precipitación acumulada en la Vega Baja, equivalentes a días de precipitación torrencial, ocho se han registrado en la segunda mitad de la serie (1950-2019), a partir de 1985.

Este incremento en la intensidad en las precipitaciones se aprecia a partir de la variación observada de las precipitaciones máximas anuales en 24 h obtenidas para el promedio de la superficie del territorio de la Comunidad Valenciana entre enero de 1950 y abril de 2020 (Figura 11).



Figura 11. Precipitación máxima anual en 24 horas en el promedio de la superficie de la Comunidad Valenciana y tendencia.

Se observa una tendencia estadísticamente significativa con un 95% de nivel de confianza de que la precipitación máxima anual en 24 horas ha aumentado en las últimas décadas un porcentaje del 38%.

Esta tendencia observada en el incremento de la intensidad de las precipitaciones probablemente tenderá a aumentar en los próximos años según las indicaciones de las proyecciones de los escenarios de cambio climático (Coumou et al., 2018; Sánchez Laulhé, 2019)

5. PROYECCIONES CLIMATICAS

Desde AEMET se han generado los escenarios regionalizados de cambio climático para España (*Proyecciones Climáticas Para El Siglo XXI - AEMET*; *Visor de Escenarios de Cambio Climático*) a partir de los cuales se puede estimar cual va a ser la tendencia de los diferentes parámetros en función de los diferentes escenarios de emisión.

La comparación del incremento en la temperatura media anual para la Comunidad Valenciana presentado en el apartado anterior respecto a la información presentada por los escenarios de cambio climático, muestra que este ascenso es coherente con las previsiones de los modelos, como puede comprobarse en la Figura 12, donde se representa la evolución de la anomalía temperatura media prevista por los modelos, contemplando dos escenarios de emisión de uso habitual (*Representative Concentration Pathway*: RCP 4.5 y RCP 8.5), así como los datos medios para el conjunto de la Comunidad Valenciana observados desde 1971 hasta 2019.

La tendencia a aumentar la temperatura durante el siglo XXI es muy similar en ambos escenarios hasta mitad de siglo cuando, dependiendo de la senda de emisiones que se produzca, tenderá a estabilizarse (escenario RCP4.5), o seguirá con tendencia creciente (escenario RCP8.5). En cualquier caso, la tendencia observada a aumentar la temperatura del aire y por tanto, la mayor disponibilidad energética en la atmósfera, uno de los elementos para la intensificación de las precipitaciones torrenciales, sigue presente durante este siglo.

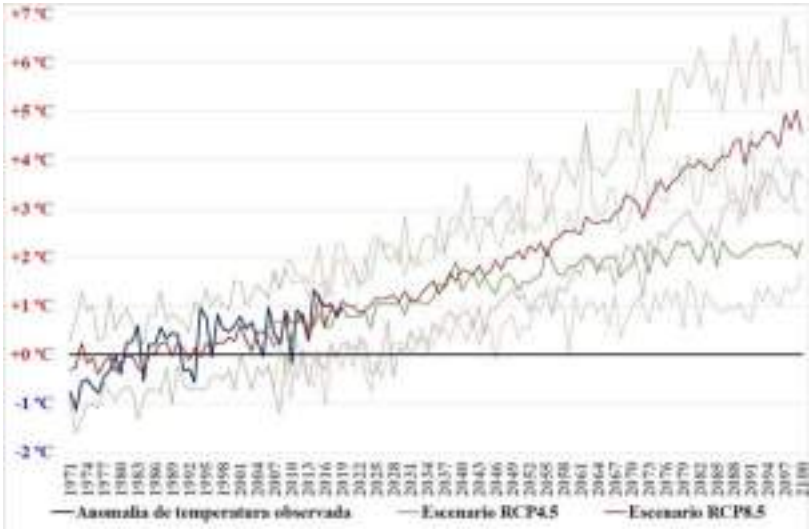


Figura 12. Anomalía de temperatura media anual en la Comunidad Valenciana (línea azul continua) y modelos climáticos. Escenario RCP4.5 (línea verde continua y dispersión de modelos punteada) y escenario RCP8.5 (línea roja continua y dispersión de modelos punteada). Periodo de referencia 1971-2000.

En cuanto a las precipitaciones, y especialmente en las precipitaciones máximas en 24h, hay una incertidumbre mucho mayor en cuanto a su evolución, como puede apreciarse en la Figura 13 en la que se representa el cambio en las precipitaciones intensas previstas en los dos escenarios de emisiones mencionados y en los que se observa como la dispersión de diferentes modelos usados en los cálculos es muy amplia, independientemente del escenario de emisiones considerado.

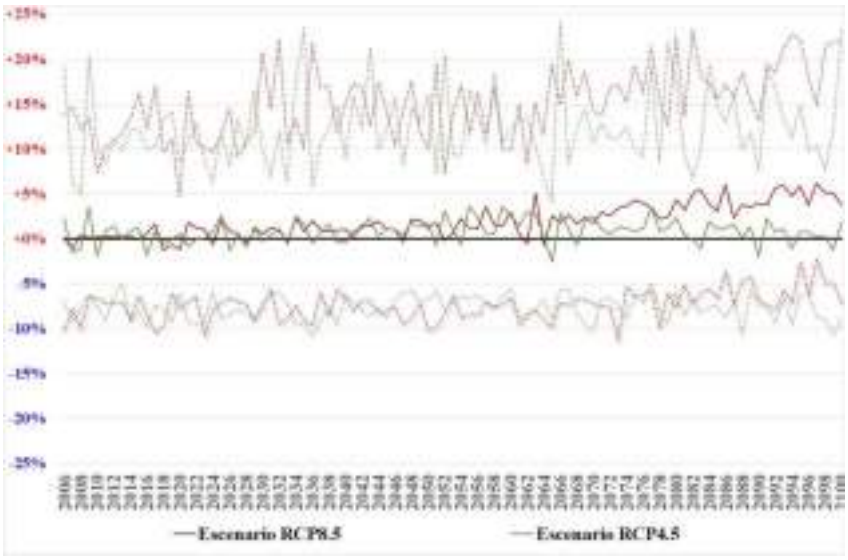


Figura 13. Cambio en las precipitaciones intensas en la Comunidad Valenciana. Escenario RCP4.5 (línea verde continua y dispersión de modelos punteada) y escenario RCP8.5 (línea roja continua y dispersión de modelos punteada).

En cualquier caso, la tendencia observada en los últimos años es que las precipitaciones intensas tiendan a acumular mayor cantidad de agua en cada episodio, tal y como se ha comentado en el apartado 4.

6. CONCLUSIONES

Para poder llevar a cabo una adecuada predicción y vigilancia de las situaciones meteorológicas AEMET dispone de sistemas de observación y predicción suficientes para ello, así como un sistema nacional de predicción que permite abordar de forma integral, teniendo en cuenta la variabilidad climática de España, este servicio.

El análisis de las situaciones y su comparación con la climatología es un factor importante para la detección del incremento de los fenómenos intensos y establecer nuevos modelos conceptuales que permitan su adecuada predicción y vigilancia.

El aumento de las temperaturas registrado en la Comunidad Valenciana en las últimas décadas es coherente con las estimaciones que proporcionan los escenarios regionalizados de cambio climático, habiendo poca incertidumbre en que esta tendencia va a continuar durante el siglo XXI.

Se ha observado una mayor intensidad y volumen de precipitación acumulada en las precipitaciones intensas en la Comunidad Valenciana, aunque hay una gran incertidumbre en cuanto a la tendencia de las mismas durante el siglo XXI.

REFERENCIAS

- AEMET (n.d.). Proyecciones climáticas para el siglo XXI http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat
- Amblar, P., María, F., Casado, J., Asunción, C., Saavedra, P., Ramos, P., Ernesto, C. & Camino, R. (n.d.). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España.
- Bates, B., Wu, S., Kundzewicz, Z. & Palutikof, J. (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico VI del IPCC. In Library.

- Coumou, D., Di Capua, G., Vavrus, S., Wang, L. & Wang, S. (2018). The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. Nature Communications, 9(1), 1-12. Nature Publishing Group. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8
- Cronología de riadas en la cuenca del Segura > Un poco de historia > El organismo > Sobre la CHS > Confederación Hidrográfica del Segura. (n.d.). https://www.chsegura.es/chs/informaciongeneral/elorganismo/unpocodehistoria/riadas.html
- Etoh, T., Murota, A. & Nakanishi, M. (1987). SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum. Hydrologic Frequency Modeling. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3953-0_17
- Ferrer Polo, J. & López, L. A. (1994). Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. Revista Digital Del Cedex.
- García Valero, J. A. & Montávez, J. P. (2016). Arcimís: Atribución de tendencias en precipitación y temperatura a cambios en la circulación atmosférica. https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/6100
- López-Bustins, Joan Albert, Sánchez-Lorenzo, Arturo Azorín-Molina, C. & Ordóñez-López, A. (2008). Tendencias de la precipitación invernal en la fachada oriental de la península ibérica. VI Congreso Internacional AEC. Cambio Climático Regional y Sus Impactos.
- López Pérez, J. M. & Núñez Mora, J. Á. (2019). 16 al 19 de diciembre de 2016: temporal de levante en Baleares, Comunidad Valenciana, Murcia y Almería. Sexto Simposio Nacional de Predicción "Memorial Antonio Mestre". Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid. https://doi.org/10.31978/639-19-010-0.497
- MITECO, Ministerio para la Transición Ecológica (2018). Inundaciones y cambio climático. Madrid.
- Miró Pérez, J., Estrela Navarro, M. J., Pastor Guzman, F. & Millán, M. (2009). Análisis comparativo de tendencias en la precipitación, por distintos inputs, entre los dominios hidrológicos del Segura y del Júcar (1958-2008). Investigaciones Geográficas. https://doi.org/10.14198/ingeo2009.49.07
- Peral, C., Navascués, B. & Ramos Calzado, P. (2017). Arcimís: Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/7573
- Ruiz García, J. A. & Núñez, J. Á. (2007). Extraordinarias en la Comunidad Valenciana. 265-273. https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2465/1/precipitacvalencia_cal2012.pdf
- Sánchez Laulhé, J. M. La amplificación ártica y el verano de 2019. Aemetblog. https://aemetblog.es/2019/10/14/la-amplificacion-artica-y-el-verano-de-2019/
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934
- Visor de Escenarios de Cambio Climático (2020). http://escenarios.adaptecca.es/
- Zorraquino, C. (2004). EL modelo SQRT-ETmax. Revista de Obras Públicas.

LIMITACIONES AL USO DEL SUELO EN ZONAS INUNDABLES: LEGISLACIÓN DE AGUAS, URBANÍSTICA Y DE PROTECCIÓN CIVIL

Ángel Menéndez Rexach
Universidad Autónoma de Madrid
menendez.rexach@uam.es

RESUMEN

Sobre los terrenos inundables concurren, al menos, tres conjuntos normativos, con sus respectivos instrumentos de planificación: la legislación de aguas, la de ordenación territorial y urbanística y la de protección civil. Todos ellos pueden establecer limitaciones de uso de las zonas inundables, lo que plantea problemas de coordinación. La explica el fundamento competencial de las limitaciones establecidas en la legislación estatal de aguas, su regulación en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, en el plan hidrológico y de gestión del riesgo de inundación de la Demarcación del Segura y en el Plan de Acción Territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana. La tesis que se mantiene es que el citado Reglamento debería haber establecido unos criterios generales, a desarrollar por los Planes Hidrológicos y el planeamiento territorial y urbanístico, configurando una regulación de las limitaciones escalonada en sucesivos niveles de concreción, en vez de definir unas limitaciones detalladas, que se reiteran en otras normativas. Los planes de protección civil no deberían regular esta materia.

1. INTRODUCCIÓN

La Directiva de Inundaciones de 2007[1] define este fenómeno como "anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por agua" (art. 2.1)[2]. Esta definición se reproduce, con matices terminológicos, en el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que incorporó al Derecho interno la citada Directiva[3]. La clave del concepto es, pues, el carácter temporal del anegamiento[4]. De ahí que los terrenos inundables sean susceptibles de otros usos, que, lógicamente, no deberían representar riesgos importantes para las personas o bienes. En

[1] Directiva 2007/60/CE, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación

[2] "Incluye las inundaciones ocasionadas por ríos, torrentes de montaña, corrientes de agua intermitentes del Mediterráneo y las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras, y puede excluir las inundaciones de las redes de alcantarillado".

[3] "Anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua ocasionadas por desbordamiento de ríos, torrentes de montaña y demás corrientes de agua continuas o intermitentes, así como las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición" (art. 3.b). Sobre la definición que utiliza el Consorcio de Compensación de Seguros, véase LLASAT BOTIJA, 2017, p. 210.

[4] Por eso no se entiende la definición de la *inundación en las zonas costeras* contenida en la letra c) del mismo art. 3 del P.G.R.IRD 903/2010: "anegamiento temporal o permanente de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua a causa de mareas, oleaje, resacas o procesos erosivos de la línea de costa, y las causadas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición". Esta definición, que no está en la Directiva, es, en mi opinión, contradictoria, pues no se entiende cómo pueden estar permanentemente anegados "terrenos que no están normalmente cubiertos de agua". Tampoco se entiende la sustantividad de la definición de *zona costera inundable* ("zona adyacente a la línea de costa susceptible de ser alcanzada por el agua del mar a causa de las mareas, el oleaje, las resacas o los procesos erosivos de la línea de costa, y las causadas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición"). Esa zona se denomina en el Derecho español desde hace más de un siglo *zona marítimo-terrestre.*

consecuencia, es de sentido común que las posibilidades de uso de los suelos inundables estén limitadas, incluso drásticamente.

Desde el punto de vista competencial, sobre los terrenos inundables concurren, al menos, tres conjuntos normativos, con sus respectivos instrumentos de planificación: la legislación de aguas, la de ordenación territorial y urbanística y la de protección civil[5]. Los criterios de coordinación entre planes se establecen en el artículo 15 del RD 903/2010. Como es característico de las disposiciones sectoriales, en esta se atribuye primacía a los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI) sobre los demás instrumentos de ordenación concurrentes (instrumentos de ordenación territorial y urbanística, planes de protección civil y cualquier otro con incidencia sobre las zonas inundables). El problema es que los PGRI no tienen naturaleza normativa[6]. Son planes de gestión, no de ordenación. No establecen limitaciones al uso del suelo. Sí lo hacen los Planes hidrológicos, por lo que serán estos los que, en la práctica, prevalecerán sobre los demás en cuanto a las limitaciones de uso sobre los terrenos inundables, en el marco general establecido en la legislación de aguas y, en concreto, en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH).

En esta Ponencia expondremos en primer lugar el fundamento competencial de las limitaciones de uso sobre dichas zonas establecidas en la legislación estatal de aguas (2). A continuación, abordaremos su regulación en el RDPH (3), en los planes hidrológicos y los de gestión del riesgo de inundación, centrándonos en los correspondientes a la Demarcación del Segura (4), para concluir con las establecidas en Plan de Acción Territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) (5).

2. FUNDAMENTO COMPETENCIAL DEL ESTABLECIMIENTO DE LIMITACIONES DE USO DEL SUELO EN LA LEGISLACIÓN DE AGUAS

Las limitaciones de uso en las zonas inundables pueden venir establecidas en la normativa autonómica de ordenación del territorio y urbanismo y en la legislación estatal de aguas[7]. La primera opción no plantea problema alguno desde el punto de vista competencial. La segunda tampoco, desde que la STC 227/1988, de 29 de noviembre, declaró que "no es inconstitucional el art. 6 de la Ley de Aguas, que sujeta las márgenes de los cauces públicos a una zona de policía de 100 metros, dado que puede considerarse como una norma general básica de protección del medio ambiente" (FJ 24 y 25). La propia Ley de Aguas faculta al Gobierno para establecer limitaciones de uso en zonas inundables y a los Gobiernos autonómicos para dictar "normas complementarias" (art. 11.3). Mediante esa remisión, la Ley de Aguas deslegalizó la regulación de la materia. Esta es la razón de que las limitaciones en cuestión estén contenidas en normas reglamentarias, que, lógicamente, no podrán afectar a las materias reservadas a la ley.

En coherencia con lo expuesto, el Real Decreto 638/2016[8], que introdujo en el RDPH la regulación vigente de esas limitaciones, en su disposición final primera, invoca como título competencial la legislación básica sobre protección del medio ambiente (art. 149.1.23ª), salvo algunas reglas que se

[5] Cfr. A. MENENDEZ REXACH, 2016, p. 90-96. V. ESCARTÍN ESCUDÉ, 2017, añade un cuarto ámbito de concurrencia, el ambiental. De ahí que se "haya creado una maraña competencial que nadie se atreve -o puede- desenredar completamente" (p. 84).

[6] Al respecto, A. MENENDEZ REXACH, 2016, p. 101-102. Comparte esta opinión A. EMBID IRUJO, 2018, p. 56.

[7] Así lo señala la "Guía Técnica de apoyo a la aplicación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial".

[8] Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales.

vinculan a la competencia estatal sobre seguridad pública (art. 149.1.29ª) y otras a la legislación, ordenación y concesión de recursos y aprovechamientos hidráulicos intercomunitarios (art. 149.1.22ª). La referencia a la seguridad pública es pertinente al estar en juego en esas limitaciones la protección civil[9]. También lo es la relativa a la competencia estatal en materia de aguas, que es un título más específico que la legislación básica sobre medio ambiente, cuyo alcance fue precisado en lo sustancial por la citada STC 227/1988[10].

El Consejo de Estado, en su dictamen[11] sobre el proyecto de Real Decreto, que sería después el 638/2016, respaldó la competencia estatal para dictarlo, basada en los preceptos constitucionales mencionados. No obstante, fue crítico con la redacción de la disposición final correspondiente, poco cuidadosa, a su juicio, en la invocación de la seguridad pública, sin tener en cuenta el alcance de la legislación básica medioambiental:

> "(…) dado que la totalidad de la Directiva es materia ambiental procede, antes de la promulgación del Real Decreto, hacer un repaso detallado de los numerosos artículos que ahora se introducen dado que, a diferencia de la muy cuidadosa delimitación de materias estrictamente de seguridad pública que hace el Real Decreto 903/2010, aquí parece haberse operado grosso modo, asumiendo que nada de la regulación del riesgo de inundaciones tiene que ver con la gestión de las aguas como dominio público ni con su gestión como ecosistema hídrico ni, por tanto, con el título competencial del artículo 149.1.23ª, lo que puede no ser del todo acertado" (IV)[12].

El RD 638/2016 fue impugnado por un Ayuntamiento, invocando, entre otros motivos, la invasión de competencias autonómicas en materia urbanística y la incompatibilidad con el planeamiento

[9] La jurisprudencia constitucional sobre el tema, desde la STC 123/1984, tiene muchos matices en los que no podemos entrar. La doctrina general más reciente se contiene en la STC 58/2017, de 11 de mayo, que resuelve el recurso interpuesto por la Generalidad de Cataluña contra diversos artículos de la Ley de Protección Civil de 2015. En ella se ratifica la doctrina de que la materia protección civil guarda relación con las competencias estatales en materia de seguridad pública ex art. 149.1.29 CE (FJ 3). La sentencia se remite a la STC 87/2016, de 28 de abril, que distingue entre la protección civil ligada a la seguridad pública y la no ligada, que es competencia exclusiva autonómica (FJ 5, en el que se contiene una síntesis del estado de la cuestión). A esta sentencia se remite, a su vez, la STC 184/2016, de 3 noviembre, que pone en conexión los conceptos de *seguridad pública* y *seguridad nacional* (FFJJ 3 y 4).

[10] El RD 903/2010, que estableció limitaciones al uso del suelo, aunque no tantas ni tan pormenorizadas como las contenidas en el RD 638/2016, invocó los mismos títulos competenciales (149.1.22ª, 23ª y 29ª) y, además los del 149.1.13.ª (dirección y coordinación de la actividad económica) y 149.1.3.ª (relaciones internacionales) (Disposición final primera).

[11] Dictamen 315/2016 de 21/07/2016. Se remite al fundamento competencial del RD 903/2010 y añade que "en la medida en que, por la materia, coinciden los artículos ahora incrustados en el RDPH con los que en este Real Decreto son competencia exclusiva en materia de seguridad pública, conforme al artículo 149.1.29.ª, poco se puede objetar, entre otras cosas porque esta legislación, a nivel reglamentario, recibe su base legal tanto del texto refundido de la Ley de Aguas como de la Ley 11/2005, del Plan Hidrológico Nacional, así como de la Ley 2/1985, de Protección Civil. Aun así, debe repasarse en profundidad dicha atribución de competencias dado que las definiciones de zona de policía, de flujo preferente en suelo rural o en suelo urbanizado y otras zonificaciones adicionales del dominio público hidráulico, es claro que tienen que tener su reflejo. De hecho lo tienen en la delimitación del mismo demanio que, desde el origen de la doctrina del Tribunal Constitucional en materia de aguas, ha venido siendo atribuida al Estado como legislación básica del artículo 149.1.23ª. Es más, la propia Directiva que el citado Real Decreto de 2010 traspuso al ordenamiento interno español, es decir, la Directiva 2007/60/CE, fue aprobada por la Unión Europea al amparo del artículo 175, apartado 1, es decir, como derecho ambiental europeo" (IV).

[12] Por lo demás, el dictamen justifica la procedencia de incluir en el RD proyectado su fundamento competencial, aunque no estuviera en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico: "(…) es lógico que esta distribución de competencias esté en el presente Real Decreto y no modifique la distribución de competencias del RDPH, entre otras cosas porque este no tiene disposición final de atribución de competencias dado que en el momento de su aprobación inicial (…) no existía la costumbre de técnica normativa ni obligación alguna de que el Estado justificara expresamente el ejercicio de sus competencias constitucionales. De hecho, todas las modificaciones, muy numerosas, de dicho RDPH posteriores a finales de los años 80 todas ellas llevan la correspondiente disposición final en el propio real decreto de modificación de aquel".

urbanístico, en cuanto las medidas de protección establecidas podían hacer inviable cualquier promoción de viviendas en suelo urbano aun cuando los propietarios ya hubieran contribuido a las cargas urbanísticas exigidas. El recurso fue desestimado por la STS 1868/2019 (ECLI: ES:TS:2019:1868). Consideró "genérica" la argumentación sobre la supuesta invasión competencial, frente a la precisa referencia a los títulos estatales esgrimidos en la disposición final primera y el soporte expreso en la legislación de aguas de las limitaciones establecidas[13]. En cuanto a la incidencia sobre el planeamiento urbanístico y los posibles derechos adquiridos, la sentencia recuerda que los planes de urbanismo no pueden incluir determinaciones incompatibles con los planes de gestión del riesgo de inundación[14]. Insiste en que "las medidas y limitaciones establecidas en razón de las previsiones de peligrosidad y riesgo de inundación han de valorarse en relación con el escenario de riesgo que se trata de evitar o prevenir, a las que han de adaptarse las edificaciones y demás usos del suelo y no a la inversa" (FJ 5). La sentencia rechaza también que el señalamiento del período de retorno de 500 años suponga extralimitación respecto de la Directiva de inundaciones y recuerda que esa referencia ya venía establecida desde mucho antes en la legislación de aguas[15].

La Generalidad valenciana interpuso también recurso contra el artículo 14 bis del RD 638/2016, que establece limitaciones a los usos del suelo en la zona inundable, alegando, entre otros motivos, la invasión de la competencia autonómica en materia de ordenación del territorio y urbanismo. La STS 3200/2019 - ECLI: ES:TS:2019:3200 declaró no haber lugar al recurso, con la misma argumentación aportada en la STS 1868/2019, a la que se remite (FD 2). La sentencia rechaza la tesis de la recurrente de que el precepto impugnado impida en suelos en situación básica de suelo rural "edificar ni tampoco

[13] FD 2: "En todo caso, la lectura de los preceptos impugnados en los que se establecen las limitaciones cuestionadas por la parte ponen de manifiesto: que tanto la ampliación de la zona de policía incluyendo las zonas de flujo preferente (art. 9.2) como la determinación de las limitaciones en los arts. 9 bis, 9 ter, 9 quater y 14 bis, se realiza bajo el amparo legal con invocación de los preceptos del TRLA (arts. 6.2 y 11.3) que sirven de cobertura. Que las concretas limitaciones que se establecen en dichos preceptos responden a la finalidad de garantizar la seguridad de las personas y bienes, refiriendo en cada caso la forma en que la medida que no se permite incide en la salud y seguridad de las personas, en el entorno o en el incremento de la vulnerabilidad de los riesgos que se tratan de evitar, así como las razones y el alcance con el que se permiten de manera limitada determinadas actuaciones, permaneciendo y justificando la adopción de cada limitación en la defensa y consecución de los objetivos propios de la protección frente a los riesgos de inundación a que responde la normativa en cuestión. Y, finalmente, en los propios preceptos impugnados se viene a indicar que las medidas y limitaciones establecidas en el ejercicio de las competencias estatales en la materia, lo son sin perjuicio de las normas complementarias que puedan establecer las comunidades autónomas (art. 9.bis); "autorización o acto de intervención administrativa previa que haya de ser otorgada por los distintos órganos de las Administraciones públicas"(art. 9.bis.3); "las administraciones competentes fomentarán la adopción de medidas de disminución de la vulnerabilidad y autoprotección, todo ello de acuerdo con lo establecido en la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil y la normativa de las comunidades autónomas" (arts. 9 bis 4; 9 ter 3; 9 quater 3); "sin perjuicio de las normas adicionales que establezcan las comunidades autónomas" (art. 9.ter 1; 9.quater 1; 14 bis. 1)".

[14] FD 3: "la elaboración y aprobación de los instrumentos urbanísticos, que definen los derechos y titularidades jurídicas de los propietarios y demás afectados, ha de tomar en consideración los mapas de riesgos naturales (art. 22.2 TRLS) y en tal sentido, según dispone el art. 15.1 del RD 903/2010, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los planes de gestión del riesgo de inundación, ni con la normativa sectorial aplicable a cada origen de inundación. En congruencia con ello, las medidas y limitaciones establecidas en razón de tales previsiones de peligrosidad y riesgo de inundación han de valorarse en relación con el escenario de riesgo que se trata de evitar o prevenir, a las que han de adaptarse las edificaciones y demás usos del suelo y no a la inversa. Y a esos distintos escenarios de peligrosidad y riesgo se refieren y responden las limitaciones establecidas en los preceptos impugnados, de manera que, desde esas consideraciones, la legalidad de sus previsiones no resulta desvirtuada por las alegaciones de la parte".

[15] "Tampoco es de apreciar la extralimitación en relación con la Directiva 2007/60/CE, que también se alega en este tercer motivo de impugnación por determinar que las zonas inundables sean las resultantes de la cartografía conforme a un periodo de retorno de 500 años, pues, además de que esa previsión no se introduce por el Real Decreto impugnado sino que figura ya en redacciones anteriores del RDPH,(…) En todo caso no cabe hablar de extralimitación respecto de la Directiva, cuando esta, no solamente no establece un límite al efecto sino que propicia la consideración de un periodo de retorno de 500 años, siendo que para el supuesto de peligrosidad media se atiende a un periodo de retorno igual o mayor de 100 años" (FD 3).

urbanizar, así como la posibilidad de edificaciones propias de suelo rural"[16].

En cuanto al suelo urbanizado, podrán permitirse nuevas construcciones, "teniendo en cuenta en la medida de lo posible [...]", (apdo. 2 del art. 14 bis). Y los apartados 3, 4 y 5 vuelven a ser limitaciones por razones de seguridad pública, competencia exclusiva del Estado, y que complementan la normativa autonómica. A mi juicio, la argumentación de la sentencia no es tan clara como sería deseable para fundamentar la rotunda conclusión de rechazo del alegato de invasión competencial[17]. Invoca la competencia estatal en materia de seguridad pública, pero no lleva a cabo una delimitación precisa de las limitaciones que derivan de este título competencial. Lo utiliza como apoyo genérico.

En resumen, la competencia estatal para el establecimiento de limitaciones de uso en las zonas inundables se puede considerar pacífica, en la jurisprudencia constitucional y en la ordinaria. Su existencia no impide la imposición de otras en la legislación autonómica de ordenación del territorio y urbanismo, como ocurre en la Comunidad valenciana con la normativa del PATRICOVA. Estas limitaciones podrán ser más exigentes, pero no menos que las impuestas por la legislación estatal. La aplicación de este conjunto de limitaciones puede plantear problemas de articulación con el planeamiento urbanístico en vigor, que habrá que resolver en función de las circunstancias del caso[18].

Para facilitar la aplicación uniforme de las limitaciones establecidas en el RD 638/2016, la Dirección General del Agua aprobó, por vía de Instrucción, una “Guía Técnica de apoyo a la aplicación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial”. La Guía será la referencia para la emisión de los informes que preceptivamente deben emitir las Confederaciones Hidrográficas conforme a la legislación de aguas[19].

3. LIMITACIONES DE USOS ESTABLECIDAS EN EL RDPH

Hemos dicho que el art. 11.3 de la Ley de Aguas faculta al Gobierno de la Nación y a los Gobiernos autonómicos para establecer limitaciones de usos en las zonas inundables. El RDPH dispone, en su art. 14.3, que esas zonas se delimitarán en función del período estadístico de retorno de 500 años. En la modificación del RDPH aprobada por RD 9/2008, de 11 de enero, se reguló el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), constituido por que el conjunto de estudios de inundabilidad realizados por el (entonces) Ministerio de Medio Ambiente y sus organismos de cuenca en colaboración con las comunidades autónomas, y, en su caso, con las administraciones locales

[16] Según la sentencia “Esta afirmación no puede deducirse del art. 14 bis impugnado, y de su mera lectura, está claro que se trata de limitaciones que "se realizarán, en la medida de lo posible, fuera de las zonas inundables". Y "en aquellos casos en los que no sea posible, se estará a lo que al respecto, establezcan las comunidades autónomas, teniendo en cuenta lo siguiente [...]". A este respecto, procede subrayar que algunas limitaciones contenidas en el artículo 14 bis impugnado, ya figuran recogidas en el el Plan de acción Territorial sobre Prevención de Riesgos de Inundación en la Comunidad Valenciana; aprobado por el Decreto Autonómico 2011/2015, de 29 de octubre, (PATRICOVA), y las restantes complementan, por razón de la seguridad pública, los requisitos fijados en la norma autonómica” (FD 2).

[17] La sentencia comentada en el texto recuerda que la misma Comunidad valenciana impugnó el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, por la misma supuesta invasión competencial y que su recurso fue desestimado por la STS de 20 de enero de 2012. Se puede conjeturar que, mediante estos recursos, la Comunidad Autónoma intenta defender su propia regulación del riesgo de inundación, contenida en la normativa del PATRICOVA, a que hemos hecho reiterada referencia.

[18] Cfr. al respecto ROMERO ALOY M.J. 2020.

[19] “Las Confederaciones Hidrográficas emplearán los contenidos establecidos en la Guía para la elaboración de los informes en materia de riesgo de inundaciones del artículo 25.4 del texto refundido de la Ley de Aguas y en los procesos de autorización en dominio público hidráulico y zona de policía. Igualmente seguirán estos preceptos en la emisión de otros informes adicionales y en la implantación del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión del riesgo de inundación, que transpone la Directiva 2007/60/CE de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación” (punto 2 de la Instrucción).

afectadas. "En esta cartografía, además de la zona inundable, se incluirá de forma preceptiva la delimitación de los cauces públicos y de las zonas de servidumbre y policía, incluyendo las vías de flujo preferente" (art. 14.3)[20]. Las zonas de flujo preferente (ZFP) deben delimitarse con el período de retorno de 100 años, frente a los 500 del resto de la zona inundable. En consecuencia, para determinar el régimen de usos en las zonas inundables hay que diferenciar entre la ZFP y el resto de la zona inundable (ZI). Así lo hace el RD 638/2016. Es importante recordar que toda la ZI está fuera del DPH. La ZFP estará, normalmente, dentro de la zona de policía, pudiendo ampliarse ésta para incluirla. En la cartografía deberán reflejarse todos esos elementos: los cauces públicos, las zonas de servidumbre y policía (con la ZFP) y el resto de la ZI.

3.1. Limitaciones en la zona de flujo preferente

3.1.1. En suelo rural

A) Usos prohibidos (art. 9 bis.1 RDPH)

a) Instalaciones que almacenen, transformen, manipulen, generen o viertan productos que pudieran resultar perjudiciales para la salud humana y el entorno (suelo, agua, vegetación o fauna) como consecuencia de su arrastre, dilución o infiltración[21].

b) Edificaciones, obras de reparación o rehabilitación que supongan un incremento de la ocupación en planta o del volumen de edificaciones existentes, cambios de uso que incrementen la vulnerabilidad de la seguridad de las personas o bienes frente a las avenidas, garajes subterráneos, sótanos y cualquier edificación bajo rasante e instalaciones permanentes de aparcamientos de vehículos en superficie.

c) Acampadas, zonas destinadas al alojamiento en los campings y edificios de usos vinculados.

d) Depuradoras de aguas residuales urbanas, salvo en aquellos casos en los que se compruebe que no existe una ubicación alternativa o, en el caso de pequeñas poblaciones, que sus sistemas de depuración sean compatibles con las inundaciones[22].

e) Invernaderos, cerramientos y vallados que no sean permeables, tales como los cierres de muro de fábrica estancos de cualquier clase.

f) Granjas y criaderos de animales que deban estar incluidos en el Registro de explotaciones ganaderas.

g) Rellenos que modifiquen la rasante del terreno y supongan una reducción significativa de la capacidad de desagüe[23].

---

[20] "La zona de flujo preferente es aquella zona constituida por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe, y de la zona donde, para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas" (art. 9.2, párrafo segundo, del RDPH, en la redacción introducida por el propio RD 9/2008, de 11 de enero). El párrafo 4º del mismo artículo aclara que "Se entiende por vía de intenso desagüe la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobreelevación mayor que 0,3 m, respecto a la cota de la lámina de agua que se produciría con esa misma avenida considerando toda la llanura de inundación existente. La sobreelevación anterior podrá, a criterio del organismo de cuenca, reducirse hasta 0,1 m cuando el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5 m en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos".

[21] En particular los siguientes: estaciones de suministro de carburante, depuradoras industriales, almacenes de residuos, instalaciones eléctricas de media y alta tensión; o centros escolares o sanitarios, residencias de personas mayores, o de personas con discapacidad, centros deportivos o grandes superficies comerciales donde puedan darse grandes aglomeraciones de población; o parques de bomberos, centros penitenciarios, instalaciones de los servicios de Protección Civil.

[22] En estos casos excepcionales, se diseñarán teniendo en cuenta, además de los requisitos previstos en los artículos 246 y 259 ter, el riesgo de inundación existente, incluyendo medidas que eviten los eventuales daños que puedan originarse en sus instalaciones y garantizando que no se incremente el riesgo de inundación en el entorno inmediato, ni aguas abajo. Además se informará al organismo de cuenca de los puntos de desbordamiento en virtud de la disposición adicional segunda. Quedan exceptuadas las obras de conservación, mejora y protección de las ya existentes.

[23] Este supuesto no es de aplicación a los rellenos asociados a las actuaciones contempladas en el artículo 126 ter (obras de protección frente a inundaciones, modificaciones en los cauces y obras de paso), que se regirán por lo establecido en dicho artículo.

h) Acopios de materiales que puedan ser arrastrados o puedan degradar el dominio público hidráulico o almacenamiento de residuos de todo tipo.
i) Infraestructuras lineales diseñadas de modo tendente al paralelismo con el cauce[24].

B) Usos autorizables (art. 9 bis. 2 RDPH)

Se configuran como excepcionales y condicionados a que no representen un aumento de la vulnerabilidad frente a las avenidas ni se incremente de manera significativa la inundabilidad del entorno. Son los siguientes:

a) la construcción de pequeñas edificaciones destinadas a usos agrícolas con una superficie máxima de 40 m2,
b) la construcción de las obras necesarias asociadas a los aprovechamientos reconocidos por la legislación de aguas,
c) otras obras destinadas a la conservación y restauración de construcciones singulares asociadas a usos tradicionales del agua, siempre que se mantenga su uso tradicional y no permitiendo, en ningún caso, un cambio de uso salvo el acondicionamiento museístico, siempre que se reúnan los siguientes requisitos.

C) Edificaciones existentes (art. 9 bis. 4 RDPH)

Parece que se les aplica el régimen de los usos autorizables, puesto que el precepto se limita a disponer que en ambos casos las administraciones competentes fomentarán la adopción de medidas de disminución de la vulnerabilidad y autoprotección, de acuerdo con lo establecido en la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil y la normativa de las comunidades autónomas. El criterio general es que las posibilidades de actuación sobre estas edificaciones dependen de lo establecido en la legislación autonómica de ordenación del territorio y urbanismo y los planes aprobados en su virtud.

D) Controles (art. 9 bis. 3 RDPH)

Toda actuación en la ZFP deberá contar con una declaración responsable, presentada ante la Administración hidráulica competente en la que el promotor exprese claramente que conoce y asume el riesgo existente y las medidas de protección civil aplicables al caso, comprometiéndose a trasladar esa información a los posibles afectados. Dicha declaración será independiente de cualquier autorización o acto de intervención administrativa previa que haya de ser otorgada por los distintos órganos de las Administraciones públicas (en particular, las autorizaciones en la zona de policía y el informe de la Administración hidráulica previsto en el artículo 25.4 del TRLA)[25].

[24] Excepcionalmente, cuando se demuestre en que no existe otra alternativa viable de trazado, podrá admitirse una ocupación parcial de la zona de flujo preferente, minimizando siempre la alteración del régimen hidráulico y que se compense, en su caso, el incremento del riesgo de inundación que eventualmente pudiera producirse. Quedan exceptuadas las infraestructuras de saneamiento, abastecimiento y otras canalizaciones subterráneas así como las obras de conservación, mejora y protección de infraestructuras lineales ya existentes. Las obras de protección frente a inundaciones se regirán por lo establecido en los artículos 126, 126 bis y 126 ter.

[25] Está claro que la autorización de la Administración hidráulica tiene que ser previa al inicio de las obras, pero no si su obtención ha de ser previa a la de otros títulos administrativos exigibles. La STS de 20 de diciembre de 2001, recurso de casación núm. 7713/1997, declaró que no había base para sostener que la autorización de los organismos de cuenca haya de ser previa a la que corresponde a las autoridades municipales, y que, además, esta naturaleza previa invalide la licencia municipal otorgada por las siguientes consideraciones: "A) Las autorizaciones que los preceptos citados contemplan lo son en previsión de «construcciones»; no existe, tampoco, en ellos una prohibición expresa de otorgamiento de otras licencias sin disponer previamente de la de los organismos de cuenca. B) El procedimiento de otorgamiento de licencias que se contempla en los artículos 52 al 54 del Reglamento del Dominio Público Hidraúlico las sujeta a las reglas generales de las leyes de procedimiento, sin otorgar privilegio y preferencia a los organismos de cuenca sobre las demás autorizaciones que puedan ser concurrentes. C) La naturaleza preferente de la licencia de los organismos hidrográficos deberían estar consagrada, de existir, en una norma con rango de ley, y no meramente reglamentaria, que es lo que sostienen los recurrentes" (FD 2). En la regulación vigente del RDPH no encuentro apoyo para alterar esta doctrina, ya que el carácter previo de la autorización se refiere al inicio de las obras, no a la obtención de otros títulos exigibles.

3.1.2. En suelo urbanizado

A) Usos prohibidos (art. 9.ter 1)[26]
Son, en sustancia, los mismos que en suelo rural[27].

B) Usos autorizables
Nuevas edificaciones, obras de reparación o rehabilitación que supongan un incremento de la ocupación en planta o del volumen de edificaciones existentes, cambios de uso, garajes subterráneos, sótanos y cualquier edificación bajo rasante e instalaciones permanentes de aparcamientos de vehículos en superficie, siempre con el condicionante de que no representen un aumento de la vulnerabilidad de la seguridad de las personas o bienes frente a las avenidas ni se incremente de manera significativa la inundabilidad del entorno.

El alcance de este condicionante no está claro. La Guía Técnica explica que "el espíritu del RDPH es la promoción de que las edificaciones existentes en la ZFP se vayan adaptando al riesgo de inundación, evitar la nueva ocupación de estas zonas con usos que aumenten la vulnerabilidad (residencias de ancianos, hospitales, etc.) y que, progresivamente y a medio plazo, cuando las instalaciones existentes en esta zona de alto riesgo cambien su uso, se analice el nuevo uso y su vulnerabilidad frente al riesgo de inundación" (2.4, p. 27). Sin embargo, no parece que se fomente mucho la adaptación cuando se dice que "En edificaciones existentes, en zona de flujo preferente y en suelos en situación básica de suelo urbanizado, sí que se podrán realizar obras de reparación o rehabilitación que supongan un incremento de la superficie de ocupación en planta o del volumen y cambios de usos, con determinados condicionantes cuyo fin es el de minimizar el incremento del riesgo de inundación derivado de su instalación". (2.4. p. 29)

El propio artículo 9.ter dispone, en su letra f) que "Las edificaciones de carácter residencial se diseñarán teniendo en cuenta el riesgo y el tipo de inundación existente y los nuevos usos residenciales se dispondrán a una cota tal que no se vean afectados por la avenida con periodo de retorno de 500 años". Esta última frase equivale a decir que los nuevos usos residenciales se localizarán fuera de la ZI, por lo que, lógicamente, no les afectarán las limitaciones establecidas para ella. En cambio, la primera frase parece referida a las edificaciones de carácter residencial situadas en la ZI, en cuyo diseño se deberá tener en cuenta, como es obvio, el riesgo y el tipo de inundación existente. Por lo tanto, en esta letra f) se contienen dos reglas que habría sido preferible deslindar en cuanto parecen referirse a supuestos diferentes.

La falta de precisión de la redacción se pone también de manifiesto en el apartado 4 de este artículo, que reitera lo preceptuado para el suelo rural en el mismo apartado del artículo 9 bis: "para los supuestos excepcionales anteriores, y para las edificaciones ya existentes, las administraciones competentes fomentarán la adopción de medidas de disminución de la vulnerabilidad y autoprotección, de acuerdo con lo establecido en la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil y la normativa de las comunidades autónomas". Pero lo que es excepcional en

[26] La sistemática de este artículo es bastante deficiente, pues entremezcla todos los supuestos, al configurar los usos prohibidos como excepciones de los autorizables.
[27] En concreto:
a) Instalaciones que almacenen, transformen, manipulen, generen o viertan productos que pudieran resultar perjudiciales para la salud humana y el entorno (suelo, agua, vegetación o fauna) como consecuencia de su arrastre, dilución o infiltración, en particular estaciones de suministro de carburante, depuradoras industriales, almacenes de residuos, instalaciones eléctricas de media y alta tensión.
d) Centros escolares o sanitarios, residencias de personas mayores, o de personas con discapacidad, centros deportivos o grandes superficies comerciales donde puedan darse grandes aglomeraciones de población.
e) Parques de bomberos, centros penitenciarios o instalaciones de los servicios de Protección Civil.

suelo rural no tiene por qué serlo en el urbanizado. La redacción del apartado 1 del art. 9.ter no apoya la consideración de los usos autorizables en esos suelos como excepcionales. Más bien al contrario, los considera *normalmente* autorizables siempre que se cumplan los requisitos que se establecen.

En cuanto al control de los usos autorizables, es aplicable lo establecido para el suelo rural: exigencia de declaración responsable y autorización o informe previo de la Administración hidráulica. Además, el promotor, antes del comienzo de las obras, deberá disponer del certificado del Registro de la Propiedad en el que se acredite que existe anotación registral indicando que la construcción se encuentra en ZFP (art. 9 ter 2 en relación al 9 bis.3).

3.1.3. Municipios con más de 1/3 de su superficie en la zona de flujo preferente o con dificultades morfológicas para futuros desarrollos

La existencia de este régimen especial ha sido criticada por considerarla injustificada[28]. Comparto esta opinión. El desarrollo urbanístico es, sin duda, una aspiración (no un derecho) de muchos municipios, pero no puede prevalecer a costa de asumir mayores riesgos de inundación. Si un término municipal ocupa ZFP en más de una tercera parte de su superficie, quizá pueda desarrollarse por otros ámbitos, aunque sean menos "apetecibles" y, si no los hubiere, es más razonable que no se desarrolle a que se flexibilicen las limitaciones de uso en la citada ZPF, con los riesgos que inevitablemente conllevará.

A) Usos autorizables

En estos municipios se podrá permitir, sin perjuicio de las normas adicionales que establezcan las comunidades autónomas, la realización de nuevas edificaciones o usos asociados en la ZFP siempre que estén fuera de la zona de policía y se cumplan los requisitos de no incrementar de manera significativa el riesgo de inundación ni la vulnerabilidad de las personas o bienes (art. 9 quater.1)[29].
Pero, en mi opinión, el cumplimiento de este artículo obliga a ubicar los nuevos usos residenciales no ya fuera de la ZFP sino fuera de la ZI. Por tanto, la admisibilidad de nuevas edificaciones ha de entenderse referida a las parcelas residenciales existentes dentro de la ZFP.
Con carácter excepcional, cuando se demuestre que no existe otra alternativa de ubicación, se puede autorizar el nuevo establecimiento de servicios o equipamientos sensibles o infraestructuras públicas esenciales para el núcleo urbano[30].

B) Usos prohibidos

Coinciden, en su mayor parte, con las prohibiciones de usos en suelo rural[31].

3.2. Limitaciones en el resto de la zona inundable

La Guía Técnica señala que "La principal novedad del Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, ha sido la de establecer unos condicionantes para las construcciones en la zona inundable fuera de la

[28] IGLESIAS GONZÁLEZ, 2019, p. 45

[29] La redacción de este artículo también es deficiente. En rigor, no se trata de que las edificaciones y usos autorizables cumplan una serie de requisitos, formales y sustantivos. Lo que hace el artículo es establecer usos autorizables y prohibidos, pero sin deslindarlos claramente.

[30] Tales como hospitales, centros escolares o sanitarios, residencias de personas mayores o de personas con discapacidad, centros deportivos, parques de bomberos, depuradoras, instalaciones de los servicios de Protección Civil o similares.

[31] En concreto, están prohibidas:
a) Instalaciones que almacenen, transformen, manipulen, generen o viertan productos que pudieran resultar perjudiciales para la salud humana y el entorno (suelo, agua, vegetación o fauna) como consecuencia de su arrastre, dilución o infiltración.
b) Invernaderos, cerramientos y vallados que no sean permeables.
c) Acopios de materiales que puedan ser arrastrados o puedan degradar el dominio público hidráulico o almacenamiento de residuos de todo tipo.
d) Grandes superficies comerciales donde puedan darse grandes aglomeraciones de población.

zona de flujo preferente, completando así lo establecido en el TRLA" (p. 43). Añade que "la primera opción a estudiar en el desarrollo de un suelo es la de evitar que la zona sea inundable, construyendo pequeñas actuaciones de defensa y por lo tanto no sea de aplicación las limitaciones del artículo 14 bis", de modo que "solo se podrán autorizar actuaciones sin limitaciones en estas zonas tras la ejecución real de las obras de defensa".

Al establecer las limitaciones el artículo 14 bis mantiene la distinción entre las dos situaciones básicas de suelo.

3.2.1. En suelo rural

La regla es que las nuevas edificaciones y usos asociados se ubicarán, en la medida de lo posible, fuera de las ZI (art. 14 bis.1). Cuando no sea posible, "se estará a lo que al respecto establezcan, en su caso, las normativas de las comunidades autónomas, teniendo en cuenta lo siguiente":

a) Las edificaciones se diseñarán teniendo en cuenta el riesgo de inundación existente y los nuevos usos residenciales se dispondrán a una cota tal que no se vean afectados por la avenida con periodo de retorno de 500 años.
b) Se evitará el establecimiento de servicios o equipamientos sensibles o infraestructuras públicas esenciales, como hospitales, centros escolares o sanitarios, etc.

De nuevo hay que decir, que la redacción se caracteriza por su imprecisión. Por lo pronto, como ya hemos señalado, si los nuevos usos residenciales se localizan a una cota superior a la avenida de 500 años, estarán fuera de la ZI. Pero lo más grave es que no se sabe si estas reglas prevalecen sobre la normativa autonómica o son meras recomendaciones, que aquélla simplemente deberá "tener en cuenta".

3.2.2. En suelo urbanizado

Podrá permitirse la construcción de nuevas edificaciones, "teniendo en cuenta, en la medida de lo posible, lo establecido en las letras a) y b) del apartado 1", es decir, los mismos (imprecisos) criterios establecidos para el suelo rural (art. 14 bis.2). En consecuencia, solo serán admisibles, en principio, nuevas edificaciones en parcelas con calificación apta para ello, ya que los nuevos usos residenciales deberían emplazarse en cota superior a la ZI. Pero la ambigüedad de la expresión "en la medida de lo posible" puede apoyar excepciones, que, lógicamente, habrán de estar suficientemente motivadas.

La Guía Técnica trata de explicar el alcance de la expresión "en la medida de lo posible" por los condicionantes que pueden existir a la hora de aplicar las limitaciones del artículo 14 bis.1 a los suelos urbanizados[32]. Esos condicionantes serán fundamentalmente urbanísticos y topográficos. En el primer

[32] En concreto (p. 45):
i. Compatibilidad con las normas urbanísticas y técnicas existentes en el municipio: cualquier actuación que sea incompatible con la normativa existente previa a la aprobación del RDPH hace que sea inviable la aplicación de estas medidas del artículo 14 bis 1.
ii. Determinaciones topográficas o geométricas: el diseño de las medidas puede necesitar un espacio topográfico o geométrico que no suele estar disponible en las zonas ya urbanas, en las que además, las alineaciones, alturas de edificios, están ya reguladas previamente y deben garantizar la accesibilidad de las personas a las mismas.
iii. Grado de desarrollo de la actuación: en aquellas actuaciones ya proyectadas, aprobadas o en trámites avanzados de su aprobación antes de la entrada en vigor del RDPH, los condicionantes exigidos en el RDPH podrían no ser de aplicación por la incompatibilidad temporal de los mismos. Por lo tanto, en suelos ya en situación de suelo urbanizado, será compleja la adopción de las medidas físicas establecidas en este RDPH, que se exigen a los suelos en situación de suelo rural. En estas zonas urbanas las medidas más viables para la prevención y recuperación ante una inundación serán las de autoprotección (sistemas de gestión de los riesgos, instalación de elementos de protección temporales, etc.) y aseguramiento, tal y como se presenta en el capítulo siguiente. La declaración responsable y la inscripción en el Registro de la Propiedad son dos herramientas que intentan dar pasos en estas materias.

aspecto, se intenta garantizar la primacía de la normativa urbanística, sin duda para evitar las consecuencias indemnizatorias que podrán derivar de la imposición de limitaciones que menoscabasen derechos adquiridos. En el segundo, porque "el diseño de las medidas puede necesitar un espacio topográfico o geométrico que no suele estar disponible en las zonas ya urbanas". La Guía reconoce que "En estas zonas urbanas las medidas más viables para la prevención y recuperación ante una inundación serán las de autoprotección (…) y aseguramiento", lo que equivale a admitir que las limitaciones previstas serán difícilmente aplicables.

En todas las actuaciones autorizables las administraciones competentes fomentarán la adopción de medidas de disminución de la vulnerabilidad y autoprotección, de acuerdo con la legislación estatal de protección civil y la normativa autonómica. El promotor deberá suscribir una declaración responsable en la que exprese claramente que conoce y asume el riesgo existente y las medidas de protección civil aplicables al caso. Esta declaración responsable deberá estar integrada, en su caso, en la documentación del expediente de autorización (art. 14 bis.3).

3.2.3. Requisitos

A efectos del régimen de intervención administrativa, el apartado 5 del art. 14 bis distingue dos supuestos, en función de la localización de la actuación:

a) En la zona de policía será precisa la autorización de los organismos de cuenca de acuerdo con el artículo 9.4 del RDPH, "a menos que el correspondiente Plan de Ordenación Urbana, otras figuras de ordenamiento urbanístico o planes de obras de la Administración, hubieran sido informados y hubieran recogido las oportunas previsiones formuladas al efecto". Resulta, pues, que en este caso no es exigible la autorización. Sin embargo, el art. 78.1 del RDPH, en la redacción introducida por el RD 638/2016, tras reiterar el párrafo entrecomillado, puntualiza que "En todos los casos, los proyectos derivados del desarrollo del planeamiento deberán ser comunicados al organismo de cuenca para que se analicen las posibles afecciones al dominio público hidráulico y a lo dispuesto en el artículo 9, 9 bis, 9 ter, 9 quáter, 14 y 14 bis". Se refuerza así el control de estas actuaciones por la Administración hidráulica. Aunque haya informado favorablemente el plan, el promotor del proyecto tiene que remitirlo a aquella para que analice las posibles afecciones. Según el precepto, se trata solo de una "comunicación" del proyecto a la Administración hidráulica, pero, si esta puede (más bien, debe) analizar las posibles afecciones al DPH, parece claro que podrá emitir un informe al respecto. Se restablece así el control de los proyectos concretos, que en la redacción anterior se había suprimido precisamente porque la Administración hidráulica había informado favorablemente el plan que les daba cobertura[33].
b) En el resto de la ZI la autorización corresponderá a la Administración competente (será la urbanística), previo informe de la Administración hidráulica de conformidad con el artículo 25.4 del TRLA. Este artículo se refiere únicamente al informe de las Confederaciones Hidrográficas sobre actos y planes de las Comunidades Autónomas y entidades locales. Sin embargo, hay que entender que el informe previo en cuestión será emitido por los citados organismos en las cuencas de competencia estatal y por el órgano autonómico competente en

[33] La Guía Técnica no parece haber tenido en cuenta el art. 78.1 del RDPH cuando afirma rotundamente que "el informe que emiten los Organismos de cuenca al amparo del artículo 25.4 del TRLA analiza de forma global el cumplimiento de la legislación en materia de aguas de los actos o planes de las administraciones locales y autonómicas. Una vez emitido el informe favorable, todos los actos que se deriven dictados en aplicación de instrumentos de planeamiento que hayan sido objeto del correspondiente informe previo no necesitan ya informe del Organismo de cuenca, puesto que ya deberán haber recogido las oportunas previsiones formuladas al efecto"(2.1., p. 18). Más adelante reitera que "Siguiendo lo establecido en el TRLA y el RDPH, este informe no será necesario emitirlo para los actos derivados del plan inicialmente informado si, como es lo normal, el plan informado ha recogido las oportunas previsiones formuladas al efecto" (p. 20). No es así, sin embargo, como se ha indicado en el texto.

las internas. De ahí que la referencia genérica a la Administración hidráulica sea correcta en este caso. Se ha cuestionado la aplicación de este informe a la parte de la ZI que esté fuera de la zona de policía, porque no tiene cobertura en el art. 25.4 del TRLA, que lo refiere únicamente a los terrenos de dominio público hidráulico y sus zonas de servidumbre y policía[34]. La crítica es fundada. Tratándose de una técnica de coordinación de competencias concurrentes, no parece que por vía reglamentaria pueda ampliarse el alcance de un informe respecto de lo establecido en la Ley.

3.3. Conveniencia de articular la regulación general y la "territorializada"

Hemos visto que el establecimiento de limitaciones de uso del suelo en las ZI tiene apoyo expreso en el TRLA (art. 11.3). Ese precepto faculta para ello al Gobierno de la Nación, sin perjuicio de la regulación complementaria de las comunidades autónomas. El RD 638/2016 se apoya expresamente en el TRLA, aunque, salvo error, no cita ese artículo[35]. Esta era, sin duda, una opción legal, compatible con la de incluir su regulación en los planes hidrológicos, en función de las peculiaridades de cada Demarcación. En efecto, estos planes incluyen una regulación de las limitaciones, que anticipa en muchos aspectos la que se establecería con carácter general por el RD 638/2016. Los PHD del segundo ciclo se aprobaron en enero de ese año, unos meses antes que el repetido RD. En caso de contradicción, este será aplicable por ser posterior, pero se podría haber actuado con mayor coordinación.

La Ley de Aguas, en su redacción originaria, incluía en el contenido obligatorio de los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) "*los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos*" (art. 40. l). En el texto refundido vigente se incluyen los mismos criterios en el resumen de los programas de medidas que forman parte del contenido obligatorio de los PH (art. 42.1.f.n' del TRLA). En esa amplia formulación cabe perfectamente el establecimiento de limitaciones al uso del suelo en las ZI.

El Reglamento de la Planificación Hidrológica (RPH), aprobado por Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, reitera esa previsión legal, al establecer el contenido de los Planes (art. 4.f.n'). Más adelante dispone que cada PH "con los datos históricos disponibles sobre precipitaciones y caudales máximos y mínimos, establecerá los criterios para la realización de estudios y la determinación de actuaciones y obras relacionadas con situaciones hidrológicas extremas" (art. 59.1). No obstante, remite a "las administraciones competentes" (se supone que las urbanísticas) la delimitación de las ZI "teniendo en cuenta los estudios y datos disponibles que los organismos de cuenca deben trasladar a las mismas, de acuerdo con lo previsto en el artículo 11.2 del texto refundido de la Ley de Aguas" (art. 59.3). Como ya hemos señalado, en la actualidad la referencia para esa delimitación es la cartografía integrante del SNCZI.

Las situaciones hidrológicas extremas (inundaciones y sequías) tienen un tratamiento específico en los planes respectivos previstos en el art. 62 RPH. Por lo que se refiere al riesgo de inundación, los PH "tendrán en consideración los planes elaborados en el ámbito territorial de la demarcación relacionados con la protección frente a las inundaciones, de los que incorporarán un resumen,

[34] ESCARTÍN ESCUDÉ, 2017, p. 101- 107

[35] "(…) la presente norma introduce la identificación de los usos y actividades vulnerables frente a avenidas que no podrán ser autorizados en las zonas de flujo preferente, incluyendo determinados supuestos excepcionales, como un régimen específico previsto para los núcleos urbanos ya consolidados en aquellos casos en los que no sea materialmente posible su instalación fuera de esta zona. La norma regula, por tanto, ciertas limitaciones (cuya intensidad se ha modulado, ponderando las circunstancias que en cada caso concurren) en la zona de mayor riesgo de inundaciones de las contempladas la normativa en vigor dada su mayor habitualidad, con el fin de proteger adecuadamente bienes jurídicos de primera magnitud. Del mismo modo, se fijan ciertas limitaciones básicas al uso de las zonas inundables, tal y como establece el TRLA, completando de este modo el desarrollo reglamentario en la materia" (Preámbulo, párrafo 13º).

incluyendo la evaluación de riesgos y las medidas adoptadas" (art. 62.2 RPH).

La instrucción de planificación hidrológica, aprobada por Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, aclara que "El programa de medidas cuyo resumen debe figurar en el plan hidrológico será el resultado de un proceso participativo de análisis de las alternativas para alcanzar los objetivos previstos en la planificación, que deberá integrar, además, los resultados del proceso de evaluación ambiental estratégica. El plan finalmente aprobado contendrá la solución a las posibles alternativas planteadas para el programa de medidas e indicará la metodología utilizada para definirla" (8.1, párrafo 3º). El organismo de cuenca recibirá, a través del Comité de Autoridades Competentes, los programas de medidas elaborados por cada administración competente y a partir de ellos procederá a su coordinación e integración en el ámbito territorial de la demarcación hidrográfica (párrafo 4º). En lo que aquí interesa la Instrucción reitera que los PH "contemplarán los planes relacionados con la protección frente a las inundaciones, de los que incorporarán un resumen, incluyendo la evaluación de riesgos y las medidas adoptadas" (9.1, párrafo 2º).

Finalmente, el RD 903/2010, puntualiza que "Los planes hidrológicos de cuenca, en el marco del artículo 42 del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, incorporarán los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos a partir de lo establecido en los planes de gestión de riesgo de inundación" (art. 14.1).

De lo expuesto resulta que la adopción de medidas específicas para prevenir y actuar frente a inundaciones es el objeto específico de los Planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI), debiendo los PH incorporar un resumen de las medidas adoptadas en ellos. Sin embargo, no parece que sea así. Al contrario, las limitaciones de uso se contienen en los PH y no en los PGRI, seguramente porque estos últimos no tienen carácter normativo. Hay, pues, distintas normativas e instrumentos, cuyo contenido y articulación no está bien definido. Sobre esto volveremos al final.

4. LIMITACIONES CONTENIDAS EN LOS PLANES HIDROLÓGICOS Y EN LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN. REFERENCIA A LA DEMARCACIÓN DEL SEGURA

4.1. Planes de gestión del riesgo de inundación

Estos planes, previstos en la Directiva de Inundaciones, se regulan en el RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación[36]. Su ámbito es el de la demarcación hidrográfica, pero se centran, lógicamente, en las zonas inundables conforme a las cartografías de peligrosidad y riesgo elaboradas. Se aprobaron el 15 de enero de 2016, mediante cuatro RRDD[37].

Los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación que hagan de los usos del suelo, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los PGRI (art. 15.1). Pero, si estos planes no son normativos, difícilmente podrán prevalecer frente a los instrumentos de ordenación del territorio y urbanismo, que sí tienen una parte normativa.

Las limitaciones al uso del suelo en las ZI son las previstas en la legislación de aguas y en los PHD,

[36] Sobre el contenido y naturaleza de los PGRI véase MENENDEZ REXACH A., 2016, p. 98 y ss.

[37] El primero, los PGRI de las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir, Segura, Júcar y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana, Ebro, Ceuta y Melilla (RD 18/2016, de 15 de enero). El segundo, el de la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa (RD 19/2016, de 15 de enero). El tercero los de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental y de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental (RD 20/2016, de 15 de enero). El cuarto, los de las cuencas internas de Andalucía: Demarcaciones Hidrográficas del Tinto, Odiel y Piedras; Guadalete y Barbate; y Cuencas Mediterráneas Andaluzas (RD 21/2016, de 15 de enero).

así como, en su caso, en la normativa de ordenación territorial, urbanística o medioambiental. El PGRI las reitera, pero no innova. Tampoco incluye medidas propias para adaptar el planeamiento urbanístico vigente, sino que se limita a señalar que la adaptación se hará "cuando proceda". Finalmente, los programas de actuación (mantenimiento y conservación de cauces, establecimiento o mejora de los sistemas de medida y alerta hidrológica, etc.) que se incluyen como "medidas" del plan, no son "creados" por éste, sino que constituyen aplicación en su ámbito de decisiones o regulaciones preexistentes, cuyo valor jurídico será diverso. Tampoco tiene carácter normativo el establecimiento de prioridades, puesto que sólo es una recomendación y no hay consecuencias si no se observa. Otro tanto puede decirse de las medidas de financiación previstas para las actuaciones y del programa de seguimiento.

4.2. Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura

En el vigente PHD del Segura[38] la regulación de las limitaciones al uso del suelo de las ZI se establece en los artículos 54 y 55 de su normativa (Sección IV. Medidas para la protección contra las inundaciones y las sequías). Comienza diciendo que "Para la gestión de inundaciones, sin perjuicio de las disposiciones reglamentarias de carácter general que estén en vigor, se tendrán en cuenta los criterios establecidos en el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación para el periodo 2015-2021, así como los previstos en los siguientes apartados" (art. 54.1). La afirmación resulta, a primera vista, sorprendente, puesto que el PGRI debería ser la referencia del PHD en esta materia, pero ya sabemos que no es así, por lo que prevalece este sobre aquél, al menos en el plano normativo.

Dentro de la "llanura de inundación" distingue entre la ZFP y el resto de la ZI, como poco después haría el RD 630/2016. En la ZFP solo son autorizables las actividades no vulnerables frente a las avenidas y que no supongan una reducción significativa de la capacidad de desagüe de dicha vía (art. 54.4)[39]. Se permitirán, con carácter general, las actuaciones destinadas a la conservación y restauración de construcciones singulares del patrimonio histórico asociadas a usos tradicionales del agua como molinos o norias, entre otros, construcciones de gran valor etnográfico y testigos de la tradición, siempre que se mantenga su uso tradicional y no permitiendo, en ningún caso, un cambio de uso salvo el acondicionamiento museístico (art. 54.6).

Están prohibidos, con carácter general (art. 54.5):

a) Nuevos usos habitacionales.
b) Nuevas edificaciones, cualquiera que sea su uso, con excepción de las obras públicas que cumplan los requisitos establecidos en el artículo 9.2 del RDPH.
c) Obras de reparación de edificaciones existentes que supongan una alteración de su ocupación en planta o de su volumen, o el cambio de uso de las mismas que incremente su vulnerabilidad frente a las avenidas.
d) Cerramientos y vallados que no sean diáfanos, tales como los cierres de muro de fábrica de cualquier clase.

El PHD no establece limitaciones específicas para el resto de la ZI, pero sí algunas reglas importantes

[38] Aprobado, junto con otros muchos, por RD 1/2016, de 8 de enero (BOE 19 de enero), corresponde al segundo ciclo de planificación. Las disposiciones normativas del Plan se incluyen en el Anexo 10. Para su manejo, habría sido mucho más adecuada la aprobación individualizada.

[39] Entre ellas, "salvo comprobación en contra", las siguientes:
a) Usos agrícolas: tierras de labranza, pastos, horticultura, viticultura, césped, silvicultura, viveros al aire libre y cultivos silvestres.
b) Uso ganadero no estabulado.
c) Usos recreativos, públicos y privados: parques y jardines, campos de golf, pistas deportivas, zonas de descanso, de natación, reservas naturales de caza, cotos de caza o pesca, circuitos de excursionismo o equitación. Dentro de estos usos no se incluyen los campings.
d) Aprovechamientos hidroeléctricos.

para la coordinación con la planificación territorial y urbanística (art. 55). En síntesis:

- Los planes territoriales y urbanísticos deberán reflejar en su parte informativa el dominio público hidráulico y sus zonas de servidumbre y policía, así como las zonas de riesgo de inundación (art. 55.1).
- En la zona de dominio público solo se admitirán los usos previstos en la legislación de aguas, prohibiéndose cualquier tipo de edificación (art. 55.2). El planeamiento urbanístico general sujetará al régimen de «fuera de ordenación» las edificaciones y las actividades preexistentes en terrenos incluidos en el dominio público hidráulico y en la zona de servidumbre de cauces que no se ajusten a esta regla, salvo las construcciones protegidas por su valor patrimonial, a las que no serán aplicables las limitaciones, sin perjuicio de que el planeamiento urbanístico, de acuerdo con lo que determine la Administración Hidráulica, prevea las actuaciones necesarias para la protección frente a los riesgos de inundación (art. 55.5 y 6).
- En las zonas inundables, el régimen de usos establecido deja de ser de aplicación cuando el planeamiento urbanístico, con el informe favorable de la Administración Hidráulica, prevea la ejecución de las obras necesarias a fin de que las cotas definitivas, resultantes de la urbanización, cumplan las condiciones de grado de riesgo de inundación adecuadas. Dichas obras deberán ser autorizadas expresamente por la Confederación Hidrográfica del Segura (art. 55.4).

En relación con la cuestión clave de la posibilidad de urbanizar en zonas inundables, el PHD del Segura, con buen criterio, solo la permite cuando el planeamiento urbanístico prevea la adopción de las medidas necesarias para prevenir el riesgo de inundación, debiendo ser autorizadas por la Confederación las obras correspondientes (art. 55.4)[40]. Fuera de este caso, cuando se tramite un plan que prevea la posibilidad de urbanizar, se deberá realizar, con carácter previo a su aprobación, un estudio de inundabilidad específico, que se pronunciará sobre la procedencia de (art. 55.7):

a) Desclasificar todo o parte del suelo afectado.
b) Establecer condiciones a la ordenación pormenorizada para evitar la localización de los usos más vulnerables en las zonas de mayor peligrosidad del sector.
c) Realizar obras de defensa y las complementarias que vengan exigidas para garantizar la seguridad de las personas, que deberán incluirse en las obras de urbanización de la actuación.
d) Imponer condiciones a la forma y disposición de las edificaciones a materializar dentro del sector.

Esta regulación es acertada, pero requiere algún comentario. El estudio de inundabilidad debería realizarse no con carácter previo a la aprobación del plan, sino mucho antes en su fase inicial de elaboración, para que en él puedan reflejarse, con conocimiento de causa, los pronunciamientos que el precepto exige. Por otra parte, se plantea la cuestión de quién costeará el estudio, que habrá de partir de la cartografía de zonas inundables existente. Si es el promotor del plan (sea el Ayuntamiento o un particular), lo más probable es que encargue un estudio que respalde las previsiones urbanizadoras, con lo que se corre el riesgo de que la Administración hidráulica lo descalifique y el asunto acabe en los Tribunales. De ahí que quepa argumentar que la función que se atribuye al estudio de inundabilidad podría ser suplida por el informe de la Confederación previsto en el artículo 55.8 y que no tendría que referirse solo a imposición de condiciones a las futuras edificaciones y la

[40] "En las zonas inundables, el régimen de usos establecido deja de ser de aplicación cuando el planeamiento urbanístico, con el informe favorable de la Administración Hidráulica, prevé la ejecución de las obras necesarias a fin de que las cotas definitivas, resultantes de la urbanización, cumplan las condiciones de grado de riesgo de inundación adecuadas para la implantación de la ordenación y usos establecidos en el indicado planeamiento. En cualquier caso, dichas obras deberán ser autorizadas expresamente por la Confederación Hidrográfica del Segura, y hasta el momento en que estas no estén terminadas no se podrán llevar a cabo obras de urbanización que resulten vulnerables frente a las avenidas o que supongan una reducción significativa de la capacidad de las vías de intenso desagüe".

realización de actuaciones de defensa que se consideren necesarias, sino también a la propia conveniencia de urbanizar los terrenos en cuestión, ya que en ningún caso los instrumentos de planeamiento urbanístico "podrán dar lugar a un incremento significativo del riesgo de inundación en el área, término municipal donde se desarrollen o en los municipios colindantes", como dispone el apartado 8 del art. 55. La regulación del informe en el art. 25.4 del TRLA da pie para ello.

4.3. Plan de Gestión del Riesgo de Inundación del Segura

Se aprobó por Real Decreto 18/2016, de 15 de enero, y actualmente está en fase de revisión. Como no tiene carácter normativo, el RD de aprobación solo hace referencia a su estructura (memoria y anejos), remitiendo a los sitios web oficiales para la consulta del contenido. Este se centra en el programa de medidas, orientado, conforme a lo previsto en el artículo 11.5 del RD 903/2010, a lograr los objetivos de la gestión del riesgo de inundación para cada zona identificada en la evaluación preliminar del riesgo de la Demarcación (Memoria 9. p. 105)[41]. La evaluación del logro de los objetivos del Plan se realizará a través de la evaluación de las medidas planteadas y para ello se han identificado una serie de indicadores, cuantitativos y cualitativos, que darán razón del progreso del Plan. En cada uno de ellos se establece un valor actual, correspondiente al inicio del período de planificación y un valor esperado a 2021, que constituye el objetivo del Plan (Memoria 10.1. p. 132).

No establece limitaciones de uso en las zonas inundables, por lo que se aplicará la regulación general del RDPH y la específica del PHD del Segura.

5. LIMITACIONES CONTENIDAS EN LA NORMATIVA TERRITORIAL Y URBANÍSTICA: EL PATRICOVA

Como hemos señalado, además de las limitaciones de uso de las ZI impuestas por la legislación estatal de aguas (RDPH y PHD), puede haber otras establecidas por la legislación autonómica de ordenación territorial y urbanística y los planes aprobados en su virtud. Por razones obvias, aquí nos limitaremos a una rápida reseña de la situación existente en la Comunidad Valenciana.

La Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje de esta Comunidad establece unos criterios generales de ordenación de los recursos hídricos en el territorio, vinculantes para el planeamiento territorial y urbanístico, entre ellos el de evitar "los nuevos desarrollos en las zonas de riesgo de inundación significativo, salvo que, a falta de alternativas de localización, puedan implementarse medidas correctoras suficientes y se evite el incremento del riesgo de inundación a terceros" (art. 9.f). La citada Ley regula los planes de acción territorial como "instrumentos de ordenación territorial que desarrollan, en ámbitos territoriales concretos o en ámbitos sectoriales específicos, los objetivos, principios y criterios de la Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana" (art. 16.1 de la Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje). Uno de ellos es el relativo al riesgo de inundación, abreviadamente, PATRICOVA[42]. Su denominación coincide con la de los PGRI, pero su contenido normativo lo asemeja a los PHD.

[41] El resumen de los programas de medidas se recoge en una tabla que las ordena según los aspectos de la gestión del riesgo: Prevención (código de medidas 13 y representadas en color naranja), Protección (código de medidas 14 y representadas en color verde), Preparación (código de medidas 15 y representadas en color rojo) y Recuperación y evaluación (código de medidas 16 y representadas en color azul) (Memoria 9.1. p. 110 y ss.). También se integran los planes de protección civil existentes en el ámbito estatal, autonómico y local.

[42] El primer PATRICOVA se aprobó en 2003, en virtud de lo previsto en la Estrategia Territorial de la Comunidad valenciana (Directriz 66: Planificación sobre riesgos territoriales naturales e inducidos). El segundo se aprobó por Decreto 201/2015, de 29 de octubre con la finalidad de adaptarse a la Directiva de Inundaciones y su transposición a la legislación estatal mediante el RD 903/2010. Sobre las limitaciones establecidas en el PATRICOVA, véase, PALENCIA JIMÉNEZ, J. S. 2017, p. 89-93.

La normativa de este Plan distingue seis niveles de peligrosidad de inundación, basados en el periodo de retorno (comprendido entre 25 y 500 años). Las limitaciones de uso en ZI establecidas son muy semejantes a las del RDPH, que seguramente se inspiró en este Plan y en las contenidas en los PHD. Pueden resumirse como sigue (las referencias a artículos son a la normativa del PATRICOVA):

5.1. Limitaciones en el dominio público hidráulico y las zonas de peligrosidad de inundación de nivel 1

Se clasificará como suelo no urbanizable de especial protección, salvo que estén clasificadas como suelo urbano, en cuyo caso que se calificarán, respectivamente, como Dominio Público Hidráulico o como protección hidráulica (art. 17.1). Estos suelos no urbanizables no podrán ser reclasificados como urbanos o urbanizables, excepto en los municipios con elevada peligrosidad de inundación, a los que después se hará referencia (art. 18.1).

En estas zonas se prohíbe cualquier tipo de edificación, salvo las previstas expresamente en el planeamiento territorial y urbanístico aprobado a la entrada en vigor del PATRICOVA, que deberán, en todo caso, realizarse con arreglo a los condicionantes específicos de edificación señalados para el suelo urbano sometido a riesgo de inundación, en el anexo I de esta normativa (art. 17.2)[43].

5.2. Limitaciones en suelo no urbanizable en las demás zonas de peligrosidad de inundación

En las de nivel 2, 3, 4 o 5 se prohíben los siguientes usos y actividades: viviendas; establos, granjas y criaderos de animales; estaciones de suministro de carburantes; actividades industriales; establecimientos hoteleros y campamentos de turismo; centros hípicos y parques zoológicos; servicios funerarios y cementerios; depósitos de almacenamiento de residuos y vertederos, a excepción de los destinados a residuos de la construcción y demolición (RCD); plantas de valorización; equipamientos estratégicos[44], infraestructuras puntuales estratégicas[45], salvo que estén avaladas por la administración competente para su autorización. Se consideran incluidas en la prohibición las actividades similares a las expresamente indicadas y, con carácter general, las que supongan una elevada concentración de personas (art. 18.2). La formulación de esta cláusula residual es criticable por su indeterminación, que deja a la Administración un margen de interpretación excesivamente amplio.

En las de nivel 6, se prohíben los mismos usos y actividades señalados en el apartado anterior, excepto las viviendas y los establecimientos hoteleros, que sí son autorizables, previa adopción de las medidas de adecuación de la edificación que se impongan (art. 18.3). Cualquier otro uso sólo podrá autorizarse si se justifica adecuadamente que debe implantarse necesariamente en el emplazamiento propuesto, y siempre que no existan otras zonas de menor peligrosidad de inundación en el entorno que sean aptas para desarrollar la actividad (art. 18.5).

En los municipios con elevada peligrosidad de inundación[46] las limitaciones de uso podrán ser

[43] Este artículo prohíbe también la realización de obras de infraestructuras que sean vulnerables o puedan modificar negativamente el proceso de inundación, incrementando los daños susceptibles de producirse como consecuencia de la misma.

[44] Como centros de emergencia, parques de bomberos, cuarteles, centros escolares y sanitarios, y pabellones deportivos cubiertos.

[45] Como plantas potabilizadoras y centros de producción, transformación y almacenamiento de energía

[46] Se consideran municipios con elevada peligrosidad de inundación aquellos en los que, al menos, las dos terceras partes (2/3) de su término municipal están afectadas por la peligrosidad de inundación de niveles 1 a 6, o bien aquellos otros que, aun no cumpliendo la condición anterior, tienen fuertes limitaciones para orientar sus futuros desarrollos hacia zonas no inundables, por la morfología de su territorio (art. 15). Estos municipios se incluirán en un registro conforme a lo previsto en las disposiciones adicionales primera y segunda de la normativa del PATRICOVA. Como puede apreciarse, el criterio de este Plan es distinto del que maneja el RDPH para flexibilizar el régimen de limitaciones: Municipios con más de 1/3 de su superficie en la zona de flujo preferente.

excepcionadas, justificadamente, fuera de la ZFP, cumpliendo las condiciones de adecuación de las edificaciones establecidas en el anexo I (art. 18.6).

5.3. Limitaciones en suelo urbanizable

Si no cuenta con un programa de actuación integrada (PAI) aprobado definitivamente, deberá ser objeto de un estudio de inundabilidad específico, con carácter previo a su programación, para determinar si procede su desclasificación (en todo o en parte), establecer condiciones de ordenación pormenorizada que eviten la localización de los usos más vulnerables en las zonas de mayor peligrosidad de inundación, realizar obras de defensa, que, en todo caso, deberán incluirse en las obras de urbanización del sector o imponer condiciones a la forma y disposición de las edificaciones (art. 19.1 y 2)[47]. Es decir, casi literalmente, las mismas exigencias que establece el PHD del Segura, por lo que se pueden dar reproducidas las consideraciones hechas sobre ellas (supra 5.3).

5.4. Limitaciones en suelo urbano y urbanizable con programa de actuación aprobado

En estos casos, para no entrar en conflicto con el planeamiento urbanístico, únicamente se exige a los Ayuntamientos imponer, cuando proceda, condiciones de adecuación de las futuras edificaciones, tomando como referencia las establecidas en el anexo I de la normativa del PATRICOVA, así como impulsar junto con las restantes administraciones públicas implicadas, la realización de las actuaciones de reducción del riesgo de inundación que sean prioritarias (art. 20).

6. COMENTARIO FINAL

La regulación de las limitaciones de uso en ZI se contiene en distintas normativas, que no están articuladas con la precisión exigible. De ahí que, como ha afirmado un reconocido especialista "a pesar de los distintos esfuerzos, estatales, autonómicos y sectoriales, continuamos sin tener una regulación clara del régimen urbanístico a que deben someterse los terrenos sujetos a inundación hidráulica"[48]. También se han puesto de relieve las carencias en la coordinación entre los PGRI y el planeamiento territorial y urbanístico[49].

En mi opinión, la regulación introducida en 2016 en el RDPH es farragosa, demasiado pormenorizada y redactada con técnica normativa deficiente. Debería haber establecido unos criterios generales, a desarrollar por los PHD y el planeamiento territorial y urbanístico, en su ámbito respectivo. Esa opción habría sido plenamente coherente con su fundamento competencial más específico, la legislación básica de protección del medio ambiente. Los PHD podrían haber adaptado a cada demarcación la regulación abstracta del RDPH, que, a su vez, debería ser desarrollada y pormenorizada por los planes territoriales y urbanísticos, según su respectiva jerarquía. Este esquema permitiría adaptar las limitaciones a las características de cada zona inundable.

En la situación actual, en vez de una regulación escalonada en varios niveles de concreción, se repiten las mismas limitaciones (o muy parecidas) en el RDPH, en los PHD y en el planeamiento territorial, como pone de relieve la lectura del PATRICOVA. Distintas normativas reiterativas, con el mismo

[47] Las industrias que puedan ocasionar contaminación accidental en caso de inundación, así como las estaciones depuradoras de aguas residuales que excedan del tratamiento primario, deberán ser evaluadas individualmente, en el procedimiento que corresponda según la normativa sectorial, a efectos de determinar la viabilidad o no de autorizar su instalación en suelos sometidos a peligrosidad de inundación (art. 19.3).

[48] IGLESIAS GONZÁLEZ F. 2019, p. 51. En particular, propone que las edificaciones existentes queden en situación de fuera de ordenación.

[49] "Actualmente no se ha conseguido una coordinación administrativa lo suficientemente eficiente como para encontrar criterios consensuados en la zona inundable que permitan establecer una estrecha relación con la planificación territorial y urbanística. Queda demostrado en los propios Planes de Gestión, los cuales no han desarrollado este objetivo previsto en el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación" (Palencia Jiménez, J. S. 2017, p. 93).

grado de detalle y con el riesgo de incurrir en contradicciones.

Los criterios generales que debería establecer la legislación de aguas están claros, a mi juicio:

a) prohibición de nuevos desarrollos urbanísticos en toda la ZI, no solo en la ZFP[50], salvo, lógicamente, que se acometan las obras necesarias para prevenir la inundación, lo que no siempre será posible, ni siquiera recomendable;
b) admisibilidad de los usos que no incrementen de manera significativa el riesgo de inundación ni la vulnerabilidad de las personas o bienes, como ahora establece el RDPH, lo que se comprobaría en cada caso mediante la correspondiente autorización;
c) las edificaciones existentes deberían quedar en un régimen de fuera de ordenación, estricto en la ZFP y atenuado en el resto de la ZI (análogo al de la zona de servidumbre de protección de la legislación de costas, por lo que se podrían realizar en ellas obras de conservación y reforma, pero no sustituirlas ni aumentar el volumen existente).

En este marco, los PHD desarrollarían los usos prohibidos y los autorizables en cada Demarcación o partes de ella, en función de sus características. Por su parte, el planeamiento territorial contendría la regulación más detallada, pudiendo establecer un régimen de limitaciones más estricto que el resultante de la legislación de aguas y la planificación hidrológica. Los planes de protección civil no deberían regular esta materia, sin perjuicio de que se remitan a la contenida en las normativas mencionadas.

REFERENCIAS

- Diez Herrero, A. (2017). Mapas de peligrosidad y riesgo por inundaciones: implicaciones técnicas y jurídicas. En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: Una perspectiva interdisciplinar*, 165 y ss. Dykinson.
- Embid Irujo, A. (2018). Elementos para la construcción de una teoría general de las sequías e inundaciones como fenómenos hidrológicos extremos. En: A. Embid Irujo (Dir.), *Sequías e inundación como fenómenos hidrológicos extremos*, 25 y ss. Thomson Reuters Aranzadi, Cizur Menor.
- Escartín Escudé, V. (2017). Sobre la ordenación urbanística de los terrenos inundables tras la aprobación del Real Decreto 638/2016. En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: Una perspectiva interdisciplinar*, 85 y ss. Dykinson.
- Iglesias González, F. (2019). La ordenación urbanística de los terrenos inundables, *RDUMA*, 329, 19 y ss.
- López De Castro García-Morato, L. (2011). La protección civil ante la prevención y gestión del riesgo de inundaciones. En: A. Menéndez Rexach (Dir.), *Protección civil y emergencias: régimen jurídico*, 249 y ss. La Ley.
- Llasat Botija, M. C. (2017). La gestión del riesgo de inundaciones. En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: Una perspectiva interdisciplinar*, 203 y ss. Dykinson.
- Martínez Martínez, M. (2018). Régimen jurídico de la propiedad en zonas inundables. En: M.
- Martínez Martínez (Dir.), *Sequías e inundación como fenómenos hidrológicos extremos*, 327 y

[50] La STS de 2 de febrero de 2010, recurso de casación 5866/2005, declaró que "El hecho de que el ordenamiento estatal de aguas no prohíba absolutamente las construcciones en la zona de policía no implica que el planeamiento urbanístico, ante el riesgo de inundaciones, como ocurre a los terrenos de la recurrente, no deba excluirlos del proceso urbanizador para destinarlos a espacios libres y zonas verdes, como hace el Plan General de Ordenación Urbana impugnado, lo que resulta por ello plenamente justificado" (FD 4º). En la misma línea, la STS de 13 de julio de 2004, recurso de casación 786/2002, afirmó que "la conformidad a derecho de una decisión que no clasificó los terrenos en cuestión como suelo apto para urbanizar, no depende de que haya quedado plenamente acreditada su inundabilidad y sí, tan sólo, de que el riesgo de ésta sea fundado" (FD 8º)

ss. Thomson Reuters Aranzadi, Cizur Menor.

- Menéndez Rexach A. (2016). El derecho de aguas ante las situaciones hidrológicas extremas: inundaciones y sequías. En: T. M. Navarro Caballero (Dir.), *Desafíos del Derecho de Aguas*, p. 85 y ss. Thomson Reuters Aranzadi, Cizur Menor.
- Palencia Jiménez, J. S. (2017). La necesidad de cambios en la planificación territorial ante el riesgo de inundaciones. El ejemplo de la Comunidad Valenciana. *Revista de Obras Públicas*, 3587, 82-95.
- Rodenas Cañadas M. A. (2013). Sistema general de defensa frente a inundaciones en la cuenca del Segura. *Revista de Obras Públicas*, 3542, 27-33.
- - Romero Aloy, M. J. (2020). Las vinculaciones singulares derivadas de la cartografía de riesgo hídrico. *Revista Aranzadi de Urbanismo y Edificación*, 44.

FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE LOS SISTEMAS DE ALERTA ANTE INUNDACIONES

Gregorio Pascual Santamaria
gregorio.pascual@gmail.com
http://www.gpascual.es

RESUMEN

En el ámbito de la respuesta ante emergencias, existen numerosos ejemplos de disfuncionamiento de los sistemas de alerta, estos fallos vienen asociados a problemas con errores inherentes al sistema o a la mala interpretación de los datos, además existen numerosos ejemplos de disfunciones, no de los sistemas de alerta en si sino de su aplicación y de la gestión de la información en el desarrollo de la emergencia. Apoyándonos en la legislación aplicable trataremos de realizar un seguimiento de las fortalezas y debilidades de los sistemas de alerta existentes en nuestro país. Describiremos brevemente la situación en la que se encuentran los diferentes sistemas de alerta y comentaremos muy brevemente algunos proyectos de investigación financiados por distintas instituciones. Analizaremos ejemplos de emergencias ocurridas en el pasado, donde tanto los sistemas de alerta, como los análisis de riesgo, funcionaron perfectamente, pero por problemas en la toma de decisiones al no disponer de tiempo suficiente para tomar medidas de mitigación, no se obtuvieron los resultados previstos. Por otra parte, en España el riesgo que causa más muertes y daños, sin llegar a ser un evento extraordinario, son las inundaciones rápidas. Sin embargo, no disponemos de un sistema de alerta suficientemente eficiente, dada la enorme dificultad en hacer predicciones con el grado de exactitud que se precisa para poder hacer frente a la emergencia desde el punto de vista de Protección Civil. Describiremos muy brevemente los sistemas que se están desarrollando en el mundo para que los resultados de los sistemas de alerta lleguen de forma rápida y segura a la población en general y a las entidades que gestionan las emergencias en particular. Es necesario insistir en la necesidad de mayor desarrollo en los sistemas de alerta, tanto en la vertiente de predicción como en la de transmisión a la población de las informaciones obtenidas, en definitiva, es imprescindible una mayor inversión en investigación y desarrollo.

1. INTRODUCCIÓN

La ley 17/2015 del Sistema Nacional de Protección Civil, prevé en su articulado un desarrollo normativo exigente en todos los aspectos de las emergencias, no obstante, mientras no se desarrolle una específica que la sustituya, mantiene la normativa existente. Por otra parte, cada vez más desde la Unión Europea se vienen dictando recomendaciones, cuando no directivas de obligado cumplimiento, que especifican la obligación de implantar determinados sistemas en aras de una mayor uniformidad de los diversos procedimientos de la Unión.

Aunque las inundaciones en España son el fenómeno natural que más daños causa, tanto en vidas, como en costes económicos y a pesar de los innumerables estudios y análisis sobre su génesis y efectos, aún no se dispone de una red de alerta global, eficaz, uniforme y precisa que permita reducir sus consecuencias.

Como se puede ver en la figura 1, en España, existen diferentes tipos de regímenes pluviales y las precipitaciones correspondientes al tipo mediterráneo, son las que más comúnmente han dado lugar

a un mayor número de fallecidos en los últimos años. El régimen pluvial mediterráneo se caracteriza por precipitaciones intensas (desarrollo rápido de fenómenos convectivos) en espacios muy cortos de tiempo y largos períodos de sequía.



Figura 1. Tipologías de regímenes fluviales (IGN) e inundaciones que han producido fallecidos en los últimos 60 años. Fuente: Catálogo Nacional de inundaciones Históricas (DGPCE).

No obstante, debido a la orografía, en la cornisa Cantábrica también se producen episodios que con un desarrollo temporal ni tan rápido como los procesos convectivos, ni tan lento como las inundaciones en las grandes cuencas, a este tipo de inundaciones las denominamos rápidas para distinguirlas de las súper-rápidas generadas por procesos convectivos. Esta tipología también complica la gestión de la emergencia por inundaciones, debido a la velocidad de su desarrollo dada la pendiente de la zona.

2. LEGISLACIÓN

Con el fin de enmarcar las posibles soluciones, haremos un breve repaso a la legislación aplicable mediante la que podríamos generar elementos que ayuden a minimizar los daños.

En el ámbito de Protección Civil, la legislación aplicable, en el momento actual, a nivel estatal en el tema de inundaciones, está recogida principalmente en la Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo de inundaciones (Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de interior, (BOE» núm. 38, de 14 de febrero de 1995)), y en el Plan Estatal de Protección Civil, (Acuerdo del Consejo de Ministros de 29 de julio de 2011, (BOE, 1 de septiembre de 2011).

A nivel autonómico las Comunidades Autónomas de Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja, Aragón, Cataluña, Castilla y León, Extremadura, Castilla la Mancha, Valencia, Murcia, Andalucía y Canarias ya tienen homologados/informados por el Consejo Nacional de Protección Civil (antes Comisión Nacional de Protección Civil) sus correspondientes planes especiales de inundaciones.

Por otra parte, sectorialmente existe un gran número de normativas que regulan otros aspectos, como el hidrológico o el de usos de suelo:

- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley del Suelo.
- Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, publicado en el BOE Nº 171, de 15 de julio de 2010, tiene como objetivo el generar nuevos instrumentos a nivel comunitario para reducir las posibles consecuencias de las inundaciones mediante la gestión del riesgo, apoyada en cartografía de peligrosidad y de riesgo (trasposición directiva).
- Real Decreto. 638/2016 de 9 de diciembre de 2016, por el que se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico aprobado por el R.D 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el R.D 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales.

Además, existe una legislación europea de obligado cumplimiento:

- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

Esta directiva de inundaciones ha impulsado la generación de investigaciones y el desarrollo de políticas que han producido, por una parte, la puesta en marcha del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, y por otra, el comienzo de la implementación de políticas tendentes a minimizar la exposición en las zonas más vulnerables (Real Decreto. 638/2016), así como el fomento de políticas de información a la población como garantía del aumento del conocimiento y el desarrollo de sinergias que ayuden a minimizar los daños.



Figura 2. Cartografía extraída del visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas inundables, mostrando las manchas de inundación en un periodo de retorno de 500años.

3. REDES DE ALERTA PROPUESTAS EN LA LEGISLACIÓN

La aplicación de la legislación citada en el punto anterior está resultando lenta y complicada, dada la cantidad de instituciones y departamentos con competencias en el tema, la desconexión administrativa, la desidia por parte de algunos sectores, los intereses creados en algunos ámbitos, la atomización de responsabilidades, la falta de presupuestos adecuados, etc.

Si fijamos la atención en el campo de la Protección Civil. En la Directriz Básica (14 de febrero de 1995) se dice en los artículos 2.3, 2.3.1 y 2.3.2:

> ***"2.3 Sistemas de previsión del peligro de inundaciones:***
> *Para la puesta en disposición preventiva de los servicios y recursos que hayan de intervenir en las emergencias por inundaciones y para posibilitar el que la población adopte las oportunas medidas de autoprotección, la planificación de protección civil deberá incluir* ***sistemas de previsión y alerta****, fundamentados en informaciones meteorológicas e hidrológicas…"*
>
> ***"2.3.1 Predicción y vigilancia meteorológica****. El objeto de la predicción meteorológica, a los efectos de la presente Directriz,* ***será el proporcionar información, con anticipación suficiente, sobre la posibilidad de fenómenos atmosféricos adversos, relacionados con el riesgo de inundaciones****, para que de acuerdo con los criterios que se especifiquen, se adopten las medidas preventivas a que haya lugar para la protección de personas y bienes, y el aviso a la población de las áreas potencialmente afectadas.*
> *En la medida que los conocimientos científicos y los recursos tecnológicos lo hagan posible, las predicciones meteorológicas proporcionarán información sobre:*
> *Génesis del fenómeno, Localización, Extensión, Duración. Intensidad."*
>
> ***"2.3.2 Previsión e información hidrológica****. El objeto de las previsiones hidrológicas será el proporcionar, ante la concurrencia de fenómenos capaces de generar avenidas,* ***la información necesaria sobre la situación hidrológica de la zona que puede generar dicha avenida*** *y de la que puede verse afectada por la misma, así como la evolución de dicha situación hidrológica, con objeto de que puedan adoptarse medidas adecuadas de protección de personas y bienes, y alertar a la población que pueda resultar afectada.*
> *En la medida de lo posible, dicha información contemplará los siguientes aspectos:*
> *Precipitaciones registradas en los puntos de control, Secuencia de niveles en puntos de control y en embalses, Previsión de la secuencia anterior en función de las previsiones meteorológicas, Previsión de zonas inundables."*

Por otra parte, en el Plan Estatal de Protección Civil ante el Riego de Inundaciones 1 de septiembre de 2011 se desarrolla lo previsto en la Directriz Básica de Protección Civil y establece en su artículo tres y siguientes, así como en su Anexo I, la necesidad de definir un procedimiento de recepción de información hidrometeorológica:

> **"3. Sistema de información y seguimiento hidrometeorológico**
>
> *3.1 Objetivo*
> *3.2 Alerta meteorológica.*
> *3.3 Alerta hidrológica.*
> *3.4 Alerta en el caso de rotura o avería grave de presas y balsas de interés general.*

En este capítulo se indican y prevén los sistemas de alerta necesarios para la vigilancia del fenómeno de las inundaciones."

"Anexo I
Criterios para la elaboración de los protocolos de alerta hidrológica En el desarrollo de los Protocolos de Alerta Hidrológica definidos en el punto 3.3, verificado la suficiente cobertura de los puntos de control, se tendrán en cuenta los siguientes criterios..."
Además, tanto la Directiva Europea como el Real Decreto 903/2010 sobre Evaluación y Gestión del riesgo de inundación también establecen en sus Planes de Gestión del Riesgo de Inundaciones, y como medidas de prevención y preparación, el desarrollo de sistemas y redes de alerta:

Directiva europea de inundaciones:
CAPÍTULO IV
PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN
Artículo 7
"3. ……Los planes de gestión del riesgo de inundación abarcarán todos los aspectos de la gestión del riesgo de inundación, centrándose en la prevención, protección y preparación, incluidos la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana, y teniendo en cuenta las características de la cuenca o subcuenca hidrográfica considerada …"

Real decreto 903/2010:
"CAPÍTULO IV
Planes de gestión del riesgo de inundación
Artículo 11. Principios rectores y objetivos.
Los planes de gestión del riesgo de inundación deben elaborarse partiendo de los siguientes principios generales: ...
4. Los planes de gestión del riesgo de inundación abarcarán todos los aspectos de la gestión del riesgo de inundación, centrándose en la prevención, protección y preparación, incluidos la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana, y teniendo en cuenta las características de la cuenca o subcuenca hidrográfica considerada…"

Como se puede apreciar toda la legislación aplicable y en las diferentes épocas en que se han ido publicando exigen el desarrollo de redes de alerta como medidas de prevención y de preparación.

En España existe un desarrollo considerable de determinados sistemas de vigilancia para diferentes riesgos (sísmico, volcánico, incendios forestales, radiológico…), sin embargo, en el ámbito hidrológico, estos sistemas de vigilancia no son homogéneos ni uniformes.

Junto a las Demarcaciones Hidrográficas con sistemas avanzados en desarrollo y exposición de resultados, existen otras donde o bien no funcionan los sistemas de aviso por falta de presupuesto, o por los mismos motivos, no se pueden distribuir las informaciones obtenidas. Cada Demarcación Hidrográfica, en uso de sus competencias, ha desarrollado sistemas que en muchos casos son incompatibles entre ellos y en otros producen resultados muy difíciles de tratar de forma automática a nivel nacional, ni siquiera en la definición de umbrales de aviso se tienen criterios homogéneos; en el Duero se habla de umbrales de alerta y alarma, en el cantábrico los umbrales son seguimiento-prealerta-alerta, y los valores supuestamente adaptados a las idiosincrasias de cada demarcación.

Mientras que en el ámbito meteorológico ocurre justo lo contrario: La Agencia Española de Meteorología (AEMET) centraliza la información a nivel Estatal produciendo informaciones de seguimiento y predicción para todo el territorio nacional, en este caso el problema podría consistir en la capacidad de realizar predicciones para escalas mucho mayores que garanticen avisos en tiempo a las zonas que serán previsiblemente dañadas.

4. REDES DE ALERTA EXISTENTES

4.1. Hidrológicas

Los **Sistemas Automáticos de Información Hidrológica** (SAIH) proporcionan, en el caso de que estén operativos, la información de la evolución de los caudales y niveles del agua circulante, así como el estado de ocupación de los embalses. Son una herramienta fundamental para el seguimiento y control de inundaciones y en principio dan datos en tiempo real sumamente valiosos para la toma de decisiones en una emergencia.

Presentamos a continuación, un listado con los enlaces a las páginas webs de las distintas cuencas hidrográficas donde se ubican los resultados de los distintos sistemas de información hidrológica, y en donde se pueden consultar (caso de estar operativos) los datos de caudal y ocupación de los embalses en tiempo real:

- SAI Cantábrico.
- SAIH del Duero.
- SAIH del Guadalquivir.
- SAIH del Guadiana.
- SAIH del Miño-Sil.
- SAIH Ebro.
- SAIH Júcar.
- SAIH Tajo.
- SAIH-Segura.
- Información Hidrológica de Guipúzcoa.
- Información Hidrológica de la Agencia Catalana del Agua.
- Información Hidrológica de la Cuenca Galicia-Costa.
- Red Hidrometeorológica de Bizkaia.
- SAIH Sur.
- Vigilancia de avenidas de la Agencia Vasca de meteorología (euskalmet).

Estos sistemas han tenido una gestación y desarrollo muy dispar a lo largo de varios años y por tanto sus tecnologías, su desarrollo, así como y la información disponible es absolutamente heterogéneas por lo que el tratamiento conjunto de las informaciones proporcionadas es complicado y costoso, además, a esto se debe añadir que ni la información que se proporciona es homogénea y uniforme ni los sistemas de distribución de información son todo lo óptimos que pudiera desearse. Aunque algunas demarcaciones han sido pioneras en Europa en la gestión y distribución de la información, otras en muchos momentos no pueden ni siquiera ofrecer la información de la que disponen,



Figura 3. Estado de implementación de los SAIH de las diferentes Demarcaciones en diciembre de 2008, hoy por diversos motivos la gestión de la información tampoco es todo lo homogénea que sería deseable.

4.2. Meteorológicos

Las necesidades de predicción de los fenómenos rápidos y muy rápidos requieren el uso de modelos meteorológicos de última generación como el Harmony, completándolo con el seguimiento de la situación mediante radares meteorológicos, que es la tecnología que permite un seguimiento en tiempo real de la evolución de la situación atmosférica.

AEMET proporciona diferentes salidas a lo largo del día del modelo Harmony y puede consultarse en: http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/modelosnumericos/harmonie_arome/. Además, se dispone de información de distintos radares meteorológicos que se pueden consultar en: http://www.aemet.es/es/es/eltiempo/observacion/radar



Figura 4. Ubicación de los radares meteorológicos de AEMET.

Por otra parte, en Cataluña y el País Vasco existe asimismo radares meteorológicos, y en las correspondientes páginas web se publican sus registros entiempo real. Se describen a continuación la geometría de la red de radares y las páginas web donde se publican sus registros. En la figura 7 se puede observar el número de radares de la red francesa, que resulta muy superior a la red española.

METEOCAT. http://www.meteo.cat/#tabs-ara



Figura 5. Ubicación de los 4 radares meteorológicos de “Meteocat”.

EUSKALMET:http://www.euskalmet.euskadi.eus/s07-5853x/es/meteorologia/meteodat/menuradar.apl?e=5

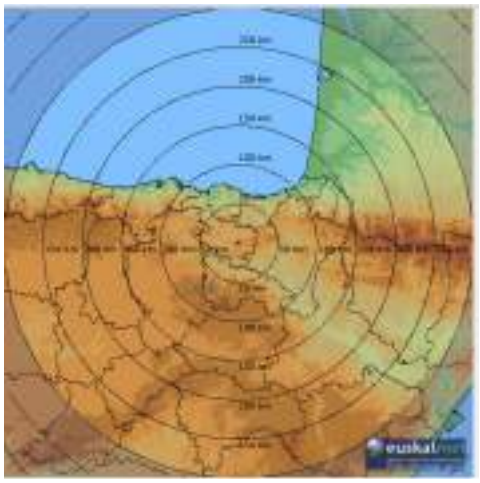


Figura 6. Ubicación del radar de la agencia vasca de meteorología.



Figura 7. Red radares francesa, donde se observa la mayor densidad de aparatos que en la española.

Así mismo existen otros radares meteorológicos en España, por ejemplo, el de la base de Rota, operada por el ejército americano: https://www.accuweather.com/es/es/rota/301932/weather-radar/301932

O radares meteorológicos usados para investigación, como el instalado en las cercanías de Navaluenga en Ávila dentro de la cuenca piloto instrumentada de Venero Claro, gestionada por la Universidad de Castilla la Mancha:
https://www.researchgate.net/publication/283796570_La_cuenca_piloto_instrumentada_de_Venero_Claro_y_la_plataforma_de_distribucion_publica_de_datos_hidrologicos

4.3. Redes de alerta de Europa

Desde el punto de vista del Mecanismo Europeo de Protección Civil (actualmente ERCC (Emergency Response Coordination Centre)), se ha desarrollado un sistema de alertas ante inundaciones denominado EFAS (European Flood Awareness System) cuyo objetivo es dar alertas hidrológicas europeas. Para ello se ha basado en multitud de modelos tanto hidrológicos como meteorológicos y emite alerta a los centros nodales que son las Demarcaciones Hidrográficas (que proporcionan datos) y a los centros de emergencias.

La Dirección General de Protección Civil fue el primer centro de Protección Civil europeo incluido como receptor de alertas, después de un arduo trabajo para convencer a los técnicos de EFAS y de las Demarcaciones Hidrográficas que la información sobre alertas hidrológicas podía ser relevante en la preparación de determinadas emergencias.

No obstante, este sistema está, a mi parecer, aún en fase experimental y tiene un carácter demasiado científico y minucioso generando en el gestor de protección civil más dudas que ayudas. Las alertas que genera carecen de una componente práctica que sirva para que los gestores de protección civil tomen las medidas necesarias para reducir los posibles daños, en este sentido los datos que aportan los diferentes SAIH son de mayor utilidad. Además de momento EFAS no tiene en cuenta la regulación hidrológica que se produce por los numerosos embalses existentes en España.

4.4. Proyectos de investigación en el ámbito de la Unión Europea sobre inundaciones

El tema de inundaciones en general y de sistemas de alerta en particular ha sido tratado con cierta profusión en los proyectos de investigación de las diferentes instituciones que subvencionan la investigación en España y en Europa. En los últimos años han sido muchos los proyectos de diferentes instituciones, generalmente consorciadas, que han obtenido financiación para abordar sus proyectos de investigación.

En general los proyectos duran mientras existen fondos, cuando los fondos se terminan normalmente las investigaciones quedan, pero su aplicación práctica en la realidad cotidiana se desvanece y las instituciones que han realizado la investigación quedan a la espera de una nueva subvención con otro proyecto, con los mismos socios o con otros, que les permita seguir sus investigaciones. La aplicación de los resultados de las diferentes investigaciones es en general poco eficaz y las líneas de financiación se quedan en subvencionar investigación básica, pero no repercute en aplicaciones directas para gestionar los estados de emergencia.

Algunos de los proyectos financiados por la Unión Europea y en los que participó la Dirección General de Protección Civil:

- FORMIDABLE: desarrollo informático, para la alerta y gestión de catástrofes naturales (inundaciones y sismos), *no tuvo continuidad*.

- SPHERE: recopilación de datos de avenidas y paleo-avenidas para el cálculo de períodos de retorno. *Se utilizo para confirmar alguna inundación en el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas*.
- EMEREGSAT: diseminación en tiempo casi real de datos de observación de la tierra, mediante satélite para apoyo a la toma de decisiones en situaciones de emergencia (financiado por la Agencia Espacial Europea). *Cuando activamos el sistema desde Protección Civil, tardaron más de tres días en llegarnos algunos datos.*

Todos ellos siguieron la tónica general descrita y cuando termino la duración del proyecto y la financiación, termino el proyecto dejando un cierto entrenamiento de los participantes, pero sin resolver de una forma continua, los problemas que se habían planteado.

Por otra darte, desde el Centro de Recerca aplicada en Hidrometeorológica (CRAHI) de la Universidad Politécnica de Cataluña se han coordinado algunos de los proyectos mas interesantes en este ámbito durante los últimos años:

- ERICHA (2015-2017), es el tercer proyecto de una trilogía de proyectos exitosos de prevención de las inundaciones en la CE, centrados en evaluar y anticipar los peligros desencadenados por precipitaciones intensas.
- HAREN (2012-2013), estableció la prueba del concepto de precipitación basada en radar que ERICHA proyecta a escala europea utilizando los mosaicos de lluvia OPERA de EUMETNET.
- EDHIT (2014-2015), realizó una demostración europea de los productos 24/7 desarrollados dentro de HAREN.
- ANYWERE (2016-2019), nació como continuación de los tres anteriores, tratando de evitar la maldición de los proyectos europeos de no tener continuidad una vez terminada la financiación. Fue un proyecto con un presupuesto importante y con una participación de entidades extraordinaria. Se realizo un gran trabajo en muchas de las áreas que abordaba, pero el final también adolece de la poca utilización del trabajo desarrollado por las entidades participantes como usuarias finales.

Probablemente el tratar de construir un proyecto de arriba abajo, sin contar con las personas con capacidad de decisión en las entidades que debieran impulsar los diferentes objetivos ha supuesto que un trabajo interesantísimo sobre el papel, haya naufragado en los mismos problemas de siempre: A la hora de tratar de aplicar los resultados de las investigaciones, no se resuelve la competencia entre instituciones operativas e instituciones investigadoras, los técnicos de ambas instituciones pretender liderar los procesos y los técnicos de las instituciones investigadoras intentan seguir siendo subvencionados.

En esta ocasión, al menos el Sistema de gestión de emergencias para el seguimiento y previsión de avenidas (EFAS) está utilizando bastante procedimientos generados al amparo de los desarrollos del CRAHI y ofrece seguimiento continuo de la situación meteorológica, predicciones de pluviometría y niveles de ríos, informando mediante probabilidades de ocurrencia de los distintos fenómenos que pudieran producirse.

- OPERA (Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information): programa de intercambio de datos radares meteorológicos dentro de la organización EUMETNET, utiliza gran parte de los radares de las instituciones meteorológicas oficiales europeas, se distribuye por internet y es el mosaico que usan todas las aplicaciones que ofrecen información de radar meteorológico.

El probable generador del problema, pudiera ser el método de escoger los proyectos a los que dotar económicamente, donde prima fundamentalmente la capacidad de generar negocio y se escogen los proyectos que más beneficio contable pudieran generar. Parecería más interesante primar los proyectos que tuvieran garantizado la continuidad avalados por instituciones con competencias en las materias de que se trata.

Por otra parte la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, ha impulsado la investigación y la realización de amplios estudios sobre análisis de riesgo de inundaciones, y hoy en España existe una cartografía de riesgo de inundaciones que cubre todo el territorio nacional para todos los periodos de retorno, esto constituye un elemento fundamental a la hora de poder cruzar información de predicciones hidro-meteorológicas con el conocimiento de los posibles daños que ocurrirán en las zonas afectadas, para un determinado periodo de retorno. Estos desarrollos (calculo de daños en zonas inundables) han sido un ejemplo de investigación que seguirá adelante actualizándose y renovándose con el paso del tiempo, dado que es coordinada por la institución responsable de la política de aguas.

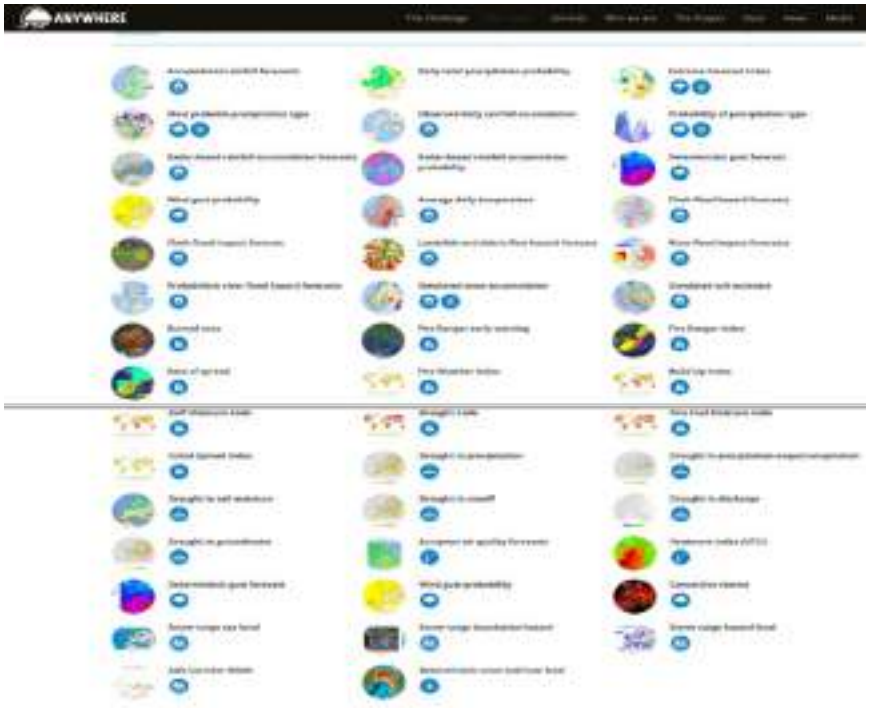


Figura 8. Catalogo de procedimientos desarrollados dentro del programa ANYWERE.

5. EXPERIENCIA OBTENIDA

Con todo lo expuesto parece claro que, en España, existen sistemas de alerta que producen valiosos datos con información sobre el estado de los caudales circulantes, en algunos casos incluso con predicciones de futuro, además existen buenas predicciones de sistemas convectivos de desarrollo ultrarrápido, sin embargo, la experiencia nos dice que el sistema es claramente mejorable.

5.1. Sistemas hidrológicos

La no uniformidad de las redes de control, hace realmente difícil tener un sistema unificado y homogéneo para toda España, además, ante la falta de presupuestos, determinadas cuencas hidrográficas se han visto obligadas a anular los contratos de mantenimiento que mantenían con empresas privadas. Esto ha degenerado en algunos casos la interrupción de los servicios, perdiendo

las cuantiosas inversiones que se han venido realizando en los sistemas, y en otros en el desmantelamiento de algunas instalaciones.

Es necesaria una gestión centralizada de los sistemas de alerta con presupuestos dependientes de la Dirección General del Agua, atendidos por personal propio especializado, que no dependa de los avatares presupuestarios de cada ejercicio y permita realizar una política de servicio uniforme, con mejoras continuas y homogéneas.

El problema de la falta de homogeneidad de los protocolos debiera resolverse con la propuesta de una gestión centralizada de la información que generan todos los SAIH para que de esta forma se distribuyera de una forma coordinada mediante protocolos CAP (*Common Alerting Protocol*) estandarizados.

Por otra parte, el intento de coordinación que se realizó desde la Dirección General de Protección Civil para obtener los protocolos de avisos hidrológicos por parte de las Confederaciones Hidrográficas, tal como prescribe el Plan Estatal, no han tenido los resultados esperados. Con la excepción de un par de Demarcaciones Hidrográficas no existen procedimientos homologados estandarizados que unifiquen criterios a la hora de distribuir la información. Este es otro de los motivos que debiera animar a que la autoridad hidrológica del estado se hiciera cargo de la gestión de estos avisos, que se está intentando a partir de la aplicación y desarrollo de la Directiva Europea de Inundaciones.

A pesar de los problemas, existen varias Demarcaciones Hidrográficas que disponen de sistemas de alerta que son un ejemplo para seguir y otras que han ido evolucionando desde sistemas obsoletos a sistemas operativo que funcionan, es pues posible una mejora en los servicios de las demarcaciones con dificultades.

No obstante todo lo anterior, la información sobre las inundaciones denominadas “lentas” es bastante buena[1] y aunque en general, debido al mayor tiempo de reacción, este tipo de inundaciones no genera daños en las personas, aunque si en sus bienes, es necesario seguir trabajando, como se viene haciendo desde hace tiempo, en la definición de protocolos de aviso automáticos, que mejore la capacidad de alerta a las poblaciones en riesgo.

5.2. Sistemas meteorológicos

Si bien existen redes de toma de datos meteorológicos, programas de predicción a corto plazo y la experiencia con análisis de radares meteorológicos es ya bastante extensa, las tormentas rápidas con capacidad para generar daños aún son difíciles de predecir. Esto deriva en escasos avisos emitidos en un lapso corto pero suficiente, sobre la génesis, ubicación y duración del fenómeno. Por lo tanto, es necesario seguir trabajando en acortar los tiempos de aviso, acotar las zonas de los avisos para prevenir a gestores de emergencia municipales y al público en general con tiempo suficiente.

Actualmente AEMET está preparando la distribución de los avisos mediante protocolos CAP (Common *Alerting Protocol*), y es probable que en un futuro mejorará sensiblemente la distribución de la información a los centros de control de las organizaciones interesadas en estos avisos: protección civil, ayuntamientos, asociaciones de ayuda…

A pesar de todo, pudiera ser que las redes de captura de datos no fueran suficientes y sea necesario reforzar y modernizar las redes de radares meteorológicos de AEMET con otros radares que, para no encarecer demasiado la inversión, pudieran ser de menor alcance, pero colocados con mayor

[1] Debido fundamentalmente a la información proporcionada por los diferentes SAIH.

densidad, estudiando la ubicación en función del riesgo de cada zona, además de completarla con radares aerotransportados, para una vigilancia in situ de las situaciones más peligrosas.

Mejorada la adquisición de datos y la distribución de información es necesario plantearse si de cara a un eficaz funcionamiento de las alertas y avisos, la estructura actual es la adecuada. Los sistemas de avisos desde un centro común que evidentemente son perfectos para una gestión uniforme y homogénea, no parece que puedan ser útiles para dar avisos a zonas muy locales con problemáticas específicas.

Probablemente sea necesario el rediseño de los centros de gestión de avisos para que se adapten mejor al territorio y sus características extraordinariamente variadas que tenemos en España y así poder anticipar los avisos a municipios y comarcas, con tiempo suficiente para que estos puedan desplegar las medidas de sus planes ante inundaciones que minimicen los daños esperables.

En todos estos procesos, en su desarrollo y aplicación, se debe de tener en cuenta que ya existen en el mercado aplicaciones para móviles que ofrecen la información en tiempo real de diferentes redes de radares existentes. Sin embargo, es necesario que sean técnicos con formación y experiencia los que a través de las instituciones competentes ofrezcan la interpretación oficial de los datos ofrecidos por los diferentes sistemas y no dejarlo en la buena voluntad de personas que difícilmente serían capaces de interpretar todos los datos en todas las ocasiones y obtener la mejor información posible de cara a la gestión de la emergencia.



Figura 9. Ejemplos de información ofrecida por diferentes sistemas A/ aplicación de móvil que ofrece las imágenes radar de AEMET; B/ aplicación Accuweather con los datos para USA; C/datos si filtrar de la NOOA (se puede observar la densidad de radares existentes por las manchas que generan a su alrededor).

6. ALGUNOS EJEMPLOS DE EMERGENCIAS POR INUNDACIONES EN ESPAÑA

En España tenemos multitud de ejemplos que merece la pena analizar con el fin de obtener enseñanzas que nos sirvan para que en la próxima situación de emergencia estemos sobre aviso. Aunque la casuística es numerosísima (Inundaciones en Agramunt (Lérida) con cuatro muertos, fallecidos en el Levante español en multitud de episodios, Badajoz, …), analizaremos brevemente dos ocurridos recientemente: Las Inundaciones en Cebolla (Toledo) y en Sant Llorenç de Cardassar (Mallorca), ejemplos claros de desarrollos convectivos que generan situaciones de emergencia, también repasaremos las inundaciones que el invierno pasado se repitieron sobre el levante español con especial incidencia en la desembocadura del rio Segura y el Mar Menor.

6.1. Cebolla

El 8 de septiembre de 2018 se produjo en Cebolla (Toledo) un proceso tormentoso de gran intensidad que provocaron numerosos daños en la localidad[2].

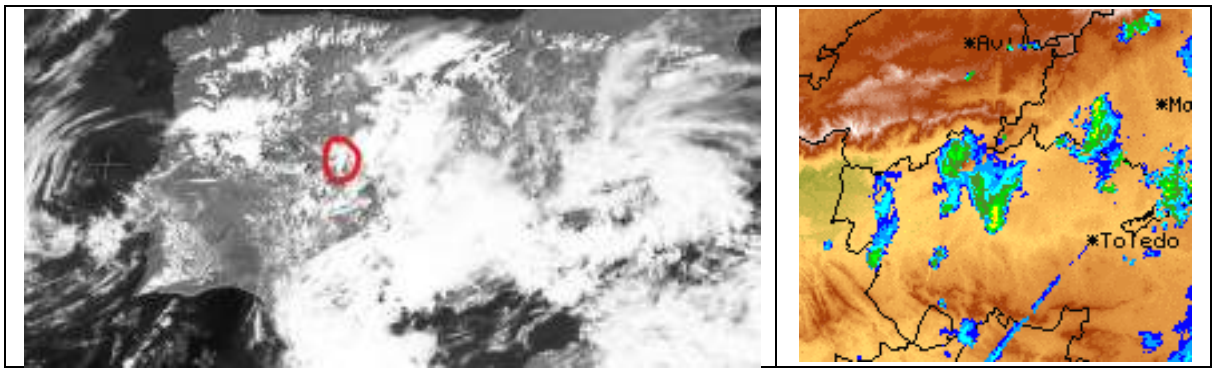


Figura 10. Imágenes de Satélite y radar meteorológico (AEMET) de la zona el día de la tormenta.

Dada la orografía, el casco urbano tapona la salida natural de las aguas del torrente que cruza la zona de menor cota de la localidad, lo que ayudó a la generación de estas inundaciones y aumento los daños:

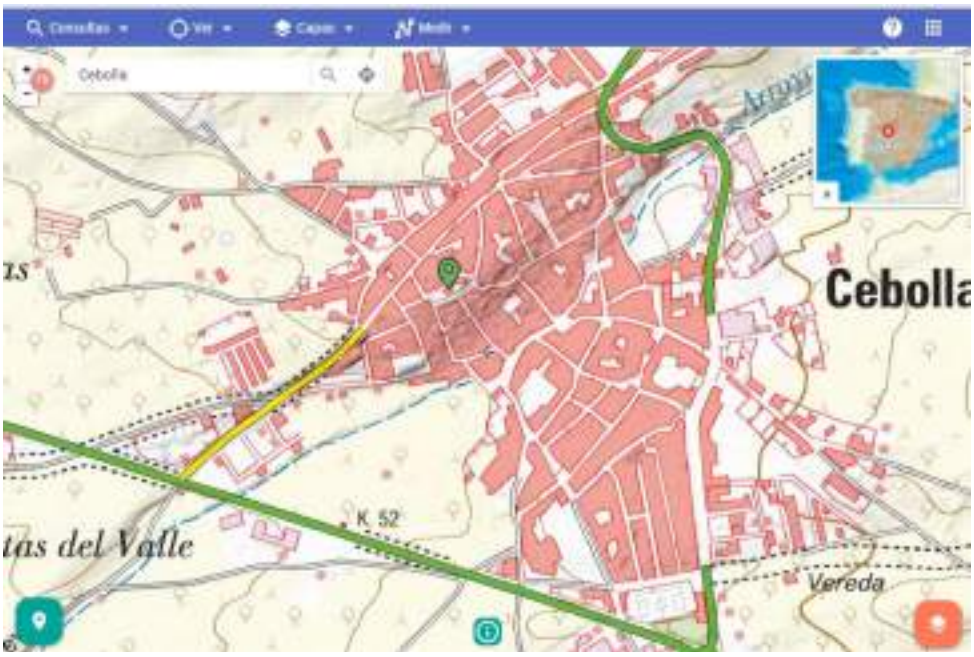


Figura 11. Mapa de zona, que muestra la orografía. Fuente: IBERPIX, IGN.

Por esta razón el Sistema nacional de Cartografía de Zonas Inundables informa de peligro de inundaciones en esta zona en todos los periodos de retorno que analiza:

[2] Video publicado en YouTube por vecinos de Cebolla

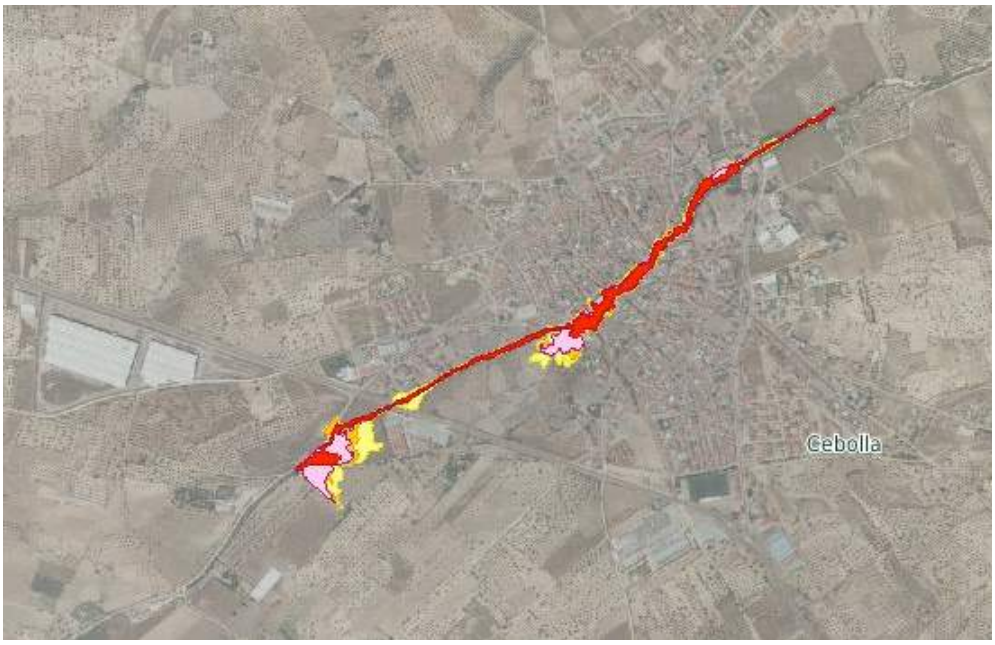


Figura 12. Mapa del CNIH con la representación de las manchas de inundación. Los distintos colores indican periodos de retorno.

Inundaciones como esta se habían producido con anterioridad, en el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas existen dos referencias de inundaciones en la zona: Diciembre de 1955 y Abril de 2011 con unas características muy parecidas a la riada del 2018.

6.2 Sant Llorenç de Cardassar

Al día siguiente el 9 de septiembre de 2018, con una situación meteorológica muy parecida, en Sant Llorenç de Cardasar (Mallorca) entre las 16 y la 24:00 horas se recogieron las cantidades que se expresan en la tabla:[3]

Estación	**Provincia**	**mm**. registrados
Arta-Colonia de Sant Pere	Illes Balears	**232,8**
Arta	Illes Balears	157,4
Son Servera	Illes Balears	97,2
Sa Pobla	Illes Balears	34,6
Llucmajor, Cap Blanc	Illes Balears	25,2

Tabla 1. Precipitación acumulada registrada

[3] Video publicado en YouTube por Atlas

La zona donde más llovió es la representada en los mapas:



Figura 13. Cartografía de la zona en dos escalas distintas, se observa la disposición del terreno que ayuda a que se produzcan inundaciones. Fuente: IBERPIX, IGN.

En ambos mapas se puede deducir que la orografía podía recargar los arroyos de la zona de San Llorenç. Además, el Sistema Nacional de Cartografía de zonas Inundables informaba de una alta peligrosidad en Sant Llorenç en todos los periodos de retorno analizados:



Figura 14. Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, los colores indican los periodos de retorno para cada una de las "manchas" de inundación.

La imagen del radar de Baleares a las 18:20 h proporcionaba la imagen que se transcribe (Figura 15):

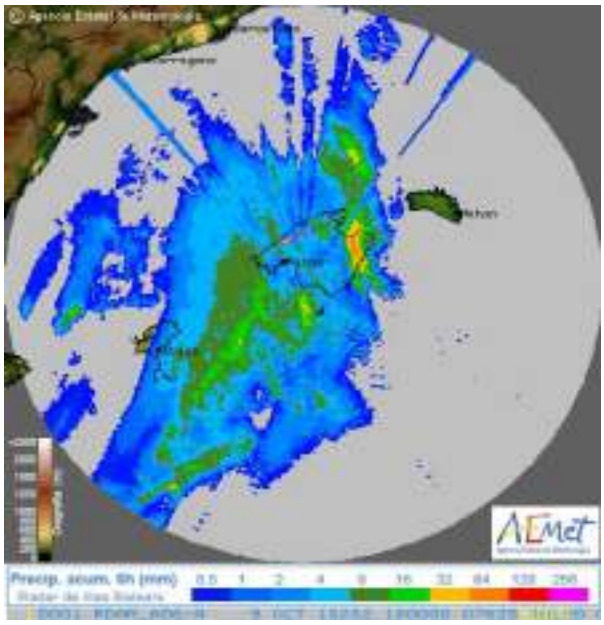


Figura 15. Imagen del radar de baleares generada a las 18:20 horas.



Figura 16. Cantidades de lluvia registradas y su distribución en el tiempo, se observa la concentración temporal y geográfica de las precipitaciones.

Por otra parte, AEMET emitió tres avisos a lo largo del día:

- **Avisos amarillos**: 10:00 h.
- **Aviso naranja**: 18:30 ya estaba lloviendo con intensidad.
- **Aviso rojo**: 21:40, ya acumulados 200 litros por metro cuadrado en seis horas.

Como en el caso de Cebolla, la dificultad evidente de predecir fenómenos convectivos intensos muy localizados, unido a la orografía y a la ocupación por construcciones de las zonas definidas como inundables, provocó la tragedia de los **trece fallecidos** en una de las emergencias que más se repiten en la España mediterránea. Está claro que son a estas emergencias a las que debemos hacer frente de una forma más intensa, Pues son ellas las que de forma continuada mayor daño causan.

6.3 Entorno del Mar Menor

Durante el otoño, invierno y primavera de los años 2019 y 2020, se han repetido como es "normal" en esta zona, inundaciones en el levante español, siendo la zona que más ha sufrido estos eventos el entorno del Mar Menor y la desembocadura del rio Segura. Los procesos meteorológicos que han desencadenado esta emergencia han sido generalmente el proceso denominado DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos). Estos procesos reciben en la prensa gran variedad de denominaciones: baja segregada, gota fría, ciclogénesis explosiva…

A grandes rasgos, la gota fría es el resultado de un frente de aire polar frío (corriente en chorro) que avanza sobre Europa occidental a gran altura (normalmente 5-9 km), generando desplomes de aire frio, que, al chocar con el aire más cálido y húmedo del Mar Mediterráneo, origina fenómenos de convección formando tormentas de evolución muy rápida y de gran intensidad.

En septiembre de 2019 se produjo la primera de una serie que genero numerosos daños en el litoral levantino. Estos fenómenos son muy conocidos y permiten una predicción con antelación suficiente. La AEMET estableció desde el día 11 de septiembre dos niveles de aviso rojo: uno por fuertes lluvias y otro por tormentas en la región de Murcia, Alicante y norte de la provincia de Almería.

Aunque los avisos estaban emitidos, la cantidad de agua fue tan grande que en muchas zonas fue materialmente imposible tratar de minimizar daños y se establecieron medidas paliativas: evacuaciones, corte preventivo de carreteras, ayuda a los afectados.

Durante la madrugada, las zonas más afectadas por las lluvias fueron Baleares y Valencia, mientras que por la mañana arreciaron en una amplia zona entre Alicante y Valencia por la tarde bajan por el sur de Alicante y se centran en Murcia y Almería.

Cinco fallecidos, 3000 personas evacuadas, decenas de carteras corteras e infinidad de edificios anegados fueron los resultados visibles de este episodio, así como cientos de desbordamientos en ríos y arroyos.

Este episodio es un ejemplo de las situaciones que merecen un análisis estructural del evento. La Demarcación Hidrográfica del Segura tiene una gran experiencia en la realización de obras con el fin de mitigar los posibles efectos de episodios que superan con mucho los valores que las infraestructuras actuales pueden soportar: derivación del Perantón, recrecimiento y construcción de números diques y embalses. Quizás esta zona en particular y todo el levante en general precisa de un paso más en las propuestas para mitigar el riesgo, que contemplen, además de la construcción de infraestructuras, cambios profundos en la estructura y forma de explotación del campo, incluyendo medidas de planificación de usos, reforestaciones masivas y prohibición de cultivos esquilmadores, perturbadores de los equilibrios.



Figura 17. Cantidad de agua acumulada entre los días 10 y13 de septiembre.

Una explicación de lo que viene sucediendo en esta zona se manifiesta con los análisis paleográficos (figura 16) realizados por el departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, que muestran como esta zona en época romana eran áreas cubiertas de agua y han ido modificándose fuertemente como resultado de la actividad humana. Es necesario revertir los procesos en la dirección de eliminar riesgos para las personas, disminuyendo las explotaciones intensivas del campo levantino.

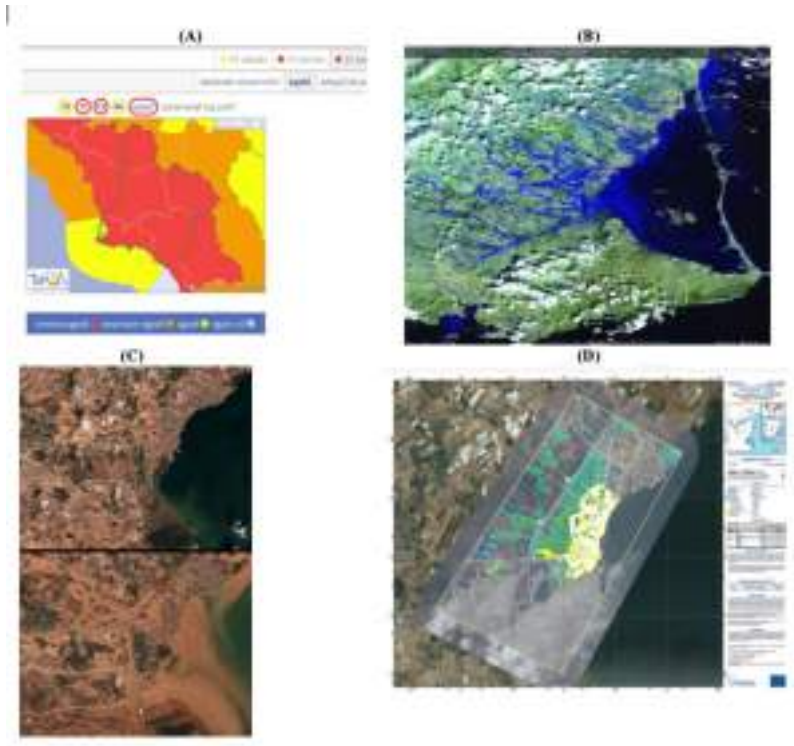


Figura 18. (A) Avisos emitidos por AEMET el día 12; (B) y (C) imágenes de satélites que muestran el proceso de inundación; (D) análisis de daños realizado por el programa Copernicus en los Alcázares.

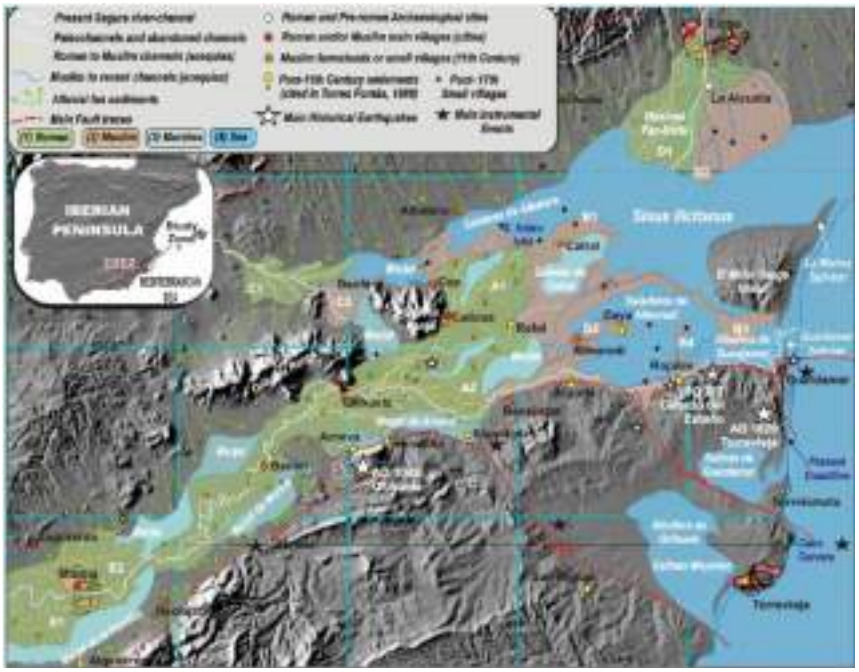


Figura 19. Representación de la paleografía de la zona en épocas históricas. La desembocadura del rio Segura era completamente distinta a su configuración actual.

7. UTILIZACIÓN DE LOS NUEVOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN LA GENERACIÓN DE ALERTAS DE PROTECCIÓN CIVIL

Si tenemos en cuenta lo expresado en la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil, que en sus artículos 6 y 12, establece:

> ***"Artículo 6. Derecho a la información***.
> *"1. Todos tienen derecho a ser informados adecuadamente por los poderes públicos acerca de los riesgos colectivos importantes que les afecten, las medidas previstas y adoptadas para hacerles frente y las conductas que deban seguir para prevenirlos.*
> *2. Dichas informaciones habrán de proporcionarse tanto en caso de emergencia como preventivamente, antes de que las situaciones de peligro lleguen a estar presentes."*
>
> ***Artículo 12. Red de Alerta Nacional de Protección Civil***.
> *"1. Se crea la Red de Alerta Nacional de Protección Civil como sistema de comunicación de avisos de emergencia a las autoridades competentes en materia de protección civil, sin perjuicio de las competencias de las comunidades autónomas, a fin de que los servicios públicos esenciales y los ciudadanos estén informados ante cualquier amenaza de emergencia.*
> *2. La gestión de la Red corresponderá al Ministerio del Interior, a través del Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación de Emergencias de Protección Civil.*
> *3. Todos los organismos de las Administraciones Públicas que puedan contribuir a la detección, seguimiento y previsión de amenazas de peligro inminente para las personas y bienes comunicarán de inmediato al Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación de Emergencias de Protección Civil cualquier situación de la que tengan conocimiento que pueda dar lugar a una emergencia de protección civil.*
> *4. Los órganos competentes de coordinación de emergencias de las comunidades autónomas serán cauce tanto para la información de las emergencias de protección civil*

al Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación de Emergencias de Protección Civil, como para la transmisión de la alerta a quien corresponda".

Para que llegue a efecto esta declaración de intenciones, es necesario desarrollar todos los sistemas que lo garanticen mediante los medios más eficientes. No obstante, como en el resto de la ley no se establecen presupuestos económicos para llevar a cabo las acciones propuestas, la probabilidad de ejecución de las tareas necesarias es más bien baja.

7.1. Bosquejo del sistema nacional de avisos a la población

Se presenta a continuación una serie de ideas y comentarios que pudieran ayudar a diseñar un sistema de avisos en consonancia con lo ordenado por la ley 17/2015.

Con el desarrollo de las comunicaciones y de la diversidad de medios que se puedan usar para trasmitir información tanto preventiva como durante la emergencia, ha aumentado exponencialmente la forma de llegar a los ciudadanos. Desde los avisos tradicionales mediante campanas o sirenas en los pueblos, radio y televisión, a los más sofisticados como teléfonos móviles, redes sociales, paneles informativos en carreteras o líneas de autobús, forman parte de los canales que pueden usarse para emitir avisos a la población. Es necesario establecer los protocolos y procedimientos que contemplen todos los sistemas, diseñando los métodos que capten la información y la distribuyan de la forma más adecuada. En la figura 20 se dan algunos ejemplos de los sistemas que pueden ser usados.

Para el desarrollo del sistema es indispensable que todos los organismos competentes en el análisis, previsión e información de los peligros usen un protocolo de comunicaciones común (*Common Alerting Protocol*, CAP). Uno de los más usuales para la generación de estos mensajes es OASIS:

http://docs.oasis-open.org/emergency/cap/v1.2/CAP-v1.2-os.html

Este protocolo genera los avisos mediante ficheros XML para que todos los servicios interesados reciban las alertas mediante los mismos códigos y hacer así al sistema interoperable, manejable y automático, tanto por los organismos que producen información, como por los que la reciben y la difunden, de forma ágil y automática.



Figura 20. Algunos de los medios que se pueden utilizar para la emisión de mensajes de información a la población.

7.2. Necesidad de sistemas exclusivos para el uso de avisos en emergencias

Aunque todas las prestaciones descritas están desarrolladas por entidades comerciales y son asequibles y utilizables por los distintos operadores, no existe una garantía total de funcionamiento en tiempo real ni una robustez de los sistemas que aseguren la no existencia de errores. Por ello es imprescindible generar una red de distribución propia que, usando la tecnología y las redes privadas, permita priorizar los sistemas de alerta y garantice de forma real la robustez del sistema.

Es pues imprescindible que el Estado genere una red independiente, gestionada por entidades estatales, que permita asegurar tanto el error cero en la transmisión de alertas como el perfecto mantenimiento y la atención 24/7, por supuesto usando las infraestructuras de los operadores concesionarios.

Existen números ejemplos de desarrollos de sistemas de avisos**,** presentamos a continuación los que han sido generados por la FEMA en USA y los que se encuentran en vía de desarrollo dentro del ámbito de la Unión Europea:

A. System IPAWS Integrated Public Alert & Warning System.
Es el sistema que se está desarrollando en los Estados Unidos, existe mucha documentación, incluso en español, sobre sus características y desarrollo:
https://www.fema.gov/pdf/emergency/ipaws/ipaws_spanish_brochure.pdf
https://www.fema.gov/integrated-public-alert-warning-system
https://www.fema.gov/integrated-public-alert-warning-system-open-platform-emergency-networks
https://gobierno.usa.gov/novedades/el-app-de-fema-en-espanol-una-respuesta-agil-ante-desastres-naturales, Donde existe una APP en castellano de información de emergencias.
Para información técnica: https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1839-25045-9302/eas_best_practices_guide.pdf

B. La **Unión Europea,** a través de organizaciones de apoyo como **EENA** (European Emergency Number Association) está desarrollando **recomendaciones** para unificar los posibles sistemas de aviso, a través de agrupaciones de los 112, mediante la publicación de borradores de normas, estas recomendaciones se pueden consultar en:
http://standards.globalspec.com/std/1273726/etsi-ts-102-182
y cada una de ellas en:

- **ETSI TR 102 444:**
  http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102400_102499/102444/01.01.01_60/tr_102444v010101p.pdf
- **ETSI TS 102 182**:
  http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102100_102199/102182/01.04.01_60/ts_102182v010401p.pdf
- **ETSI TS 102 900**:
  http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102900_102999/102900/01.01.01_60/ts_102900v010101p.pdf

C. El Parlamento Europeo ha aprobado a primeros de septiembre de 2019 el establecimiento de un sistema público de avisos:



BREAKING VOTE IN SUPPORT OF ESTABLISHING A PUBLIC WARNING SYSTEM

As part of the EECC telecom legislation package, the European Parliament has just voted the establishment of a compulsory public warning system in each of the EU countries.

The objective of such a system is to provide direct information to a maximum of people present in a danger zone (terrorist attack, natural catastrophe) through their phones by way of a localised SMS or cell broadcast technology, for instance.

Such a warning system should also avoid issues

Figura 21. La aprobación por el Parlamento Europeo de un sistema de avisos común.

D. Francia ha desarrollado una aplicación de móvil para realizar avisos antiterroristas.

8. A MODO DE LECCIONES APRENDIDAS

Disminuir el riesgo se consigue disminuyendo los factores que lo definen:

Peligrosidad. Evidentemente aún no se tiene las herramientas para describir con gran precisión la formación de procesos conectivos, no obstante, si se puede mejorar los sistemas de alerta, mejorando los sistemas de predicción, realizando predicciones por meteorólogos locales que analicen la evolución de las situaciones meteorológicas con un conocimiento mayor de las condiciones específicas. Estos meteorólogos debieran esta ayudados con mayores medios, como radares meteorológicos, que pudieran ser de menor alcance, pero con mayor densidad y capacidad para predecir evolución de sistemas convectivos concretos y dar alertas de forma automática a las autoridades locales de Protección Civil.

Vulnerabilidad. Las autoridades locales debieran conocer las áreas de sus municipios que están más expuestas a los diferentes peligros y tratar de modificar las características de las diferentes zonas más expuestas para evitar daños mayores. Por otra parte, los planes de Protección Civil debieran contemplar prohibiciones de aparcamiento, de tránsito y en su caso ordenar de forma tajante evacuaciones en las zonas inundables, al menos durante las alertas definidas por los organismos científico/técnicos que las emiten.

Exposición. Aunque el riesgo cero no existe, es necesario tratar de minimizar la exposición al riesgo, tanto de las personas como de los edificios que habitan. Sería de desear que las construcciones situadas en zonas inundables, de forma periódica reevaluaran si aumento o disminuyo su exposición, recalculando los valores de las obras realizadas para mitigar los daños *(parece que tanto en Cebolla como en Sant Llorenç los canales y sumideros realizados para evacuar las aguas excedentes no tenían la capacidad adecuada para hacerlo).*

Los casos analizados y otros muchos que se vienen produciendo en suelo español, parecen poner en relieve la necesidad de una mayor inversión material en los riegos que de manera recurrente más víctimas y gastos producen en los países mediterráneos.

Por ello sintetizando parece interesante remarcar para el cualquier tipo de emergencias una serie de recordatorios generales:

A. Los planes ante emergencias han de concretarse mediante ejercicios de forma continua. Los entrenamientos continuos de todos los actuantes son la única forma de poder garantizar el éxito en la preparación ante los episodios que permiten una predicción con tiempo suficiente, aunque este tiempo sea mínimo.
B. Aunque los planes han de ser lo más automáticos posibles (ante determinado hechos se actúa siempre de determinada manera), no se puede ser tan ciego para no interpretar los hechos por parte de las personas que toman las decisiones y estas deben de tener conocimientos suficientes sobre los fenómenos que se desarrollan, de tal forma que les permita, si pudiera darse el caso, modificar los planes preestablecidos.
C. Si los responsables de la toma de decisiones carecen de la formación necesaria, los técnicos de las instituciones científico-técnicas que tiene encomendada la vigilancia de los fenómenos que generan catástrofes, debieran actuar proponiendo las acciones a realizar de la forma lo más enérgica posible y para ello deben de tener garantizado el acceso rápido a los comités donde se toman las decisiones, con la mayor autoridad posible. Así mismo es exigible a estos mismos técnicos un mayor compromiso con la definición de las acciones a desarrollar durante la emergencia, y no quedarse en una simple recomendación.
D. Es imprescindible que en las salas de vigilancia se tenga acceso a **todas** las informaciones posible sobre el hecho, incluyendo las noticias difundidas por las redes sociales, aunque este canal debe de comprobarse en todos los casos, dado que como es sabido, Internet es un generador de bulos. Aunque es de agradecer a las organizaciones que tratan de desmentir los bulos generados (Vost; policía; Guardia Civil…) su efectiva labor.

Para las emergencias analizadas:

I. En el caso de los fenómenos convectivos, el principal problema es la gran dificultad de predicción que existe para realizar pronósticos ajustados en tiempo y espacio:
    a. Generalmente se predice la ocurrencia de estos fenómenos en grandes áreas y con un pronóstico temporal un tanto difuso (por la tarde, al final del día…) casi siempre con una antelación suficiente para la escala de predicción, pero insuficiente para la escala de localización de daños.
    b. Sin embargo, en la actualidad ya están desarrolladas herramientas que permitirían predicciones más ajustadas en tiempo y localización.
    c. Para eventos de todo tipo, empresas especializadas en meteorología realizan predicciones acertadas, con muy poco tiempo de antelación y dan resultados suficientes para aplicar las medidas definidas en los distintos planes de emergencia, por lo tanto, es posible y necesario trasladar a los niveles administrativos que le correspondan la vigilancia de todos los aspectos de la emergencia
II. El problema pueda provenir de la organización, tanto de la predicción como de los protocolos de transmisión de los avisos. Por lo tanto, además de aumentar el número de radares meteorológicos, sería necesario que las predicciones asociadas a fenómenos convectivos se realicen por técnicos con una relación mayor con el territorio y se adapten los modelos a las condiciones locales. Generar avisos locales desde centros regionales que tienen como prioridad las predicciones nacionales, no parece funcional. Los problemas locales han de resolverse con técnicos que conozcan lo mejor posible el desarrollo de las condiciones locales, meteorológicas, hidrológicas u orográficas.
III. Dada la escasez de tiempo para la puesta en conocimiento de la ciudadanía de estas predicciones, la transmisión de estos avisos ha de hacerse aplicando las nuevas tecnologías tanto en informática como en comunicaciones y difundir los avisos en todos los sistemas que permiten informar de forma masiva y localizada a los posibles afectados: Telefonía móvil y fija, radio y televisión, paneles de carreteras, de líneas de autobuses, de información del tráfico, etc.

Para que la eficacia de los planes de emergencia sea la mejor posible, son necesarios automatismos en su aplicación. Una vez detectado un posible efecto dañino a las personas o sus bienes, es necesario aplicar de forma rápida y automática las medidas diseñadas para minimizar los daños. Por ello es crítico tomar las decisiones de activación de los diferentes niveles de riesgo, en las distintas zonas definidas, a la mayor brevedad posible, con el fin de aumentar la capacidad de respuesta de los posibles intervinientes. Es clave una colaboración estrecha entre meteorólogos, hidrólogos y técnicos de las diferentes protecciones civiles y otras organizaciones que trabajan en emergencias.

Toda esta operativa debe quedar reflejada en un documento, en el momento actual es el Plan de Emergencia de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en el nivel competencial que le corresponda. La redacción de estos documentos, así como se ejecución, puesta en práctica y actualizaciones correspondientes han de ser instantáneas y después de cualquier emergencia se debiera actualizar el Plan correspondiente resaltando los aciertos y corrigiendo los fallos, en procesos continuos de lecciones aprendidas.

REFERENCIAS

- Adhikari, P., Hong, Y., Douglas, K. R., Kirschbaum, D. B., Gourley, J.J., Adler, R. F. & Brakenridge, G. R. (2010). A digitized global floodinventory (1998–2008): Compilation and preliminary results. *J. Natural Hazards*, 55, 405–422.
- Barnolas, M. & Llasat, M. C. (2007). *Metodología para el estudio de inundaciones históricas en España e implementación de un SIG en las cuencas de Ter, Segre y Llobregat*. Ministerio de Fomento, 264 p.
- *Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo de inundaciones* (1995). https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1995-3865
- Díez-Herrero, A. (2019). Patrimonio e inundaciones ¿una relación de riesgo? En: AGROMAYOR, E. ET AL. (Ed.), *Congreso Internacional "Patrimonio cultural y catástrofes: Lorca como referencia"*, 2. Actuaciones en catástrofes, Ponencias, pp. 99-113. Instituto del Patrimonio Cultural de España, Secretaría General Técnica, Ministerio de Cultura y Deporte, Madrid, 421 pp.
- *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32007L0060
- EM-DAT: The OFDA/CRED *International Disaster Database* (2013). Université Catholique de Louvain, Brussels. www.emdat.be
- Font, I. (1983). *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología, 296 pp.
- *Hidrología Histórica. Confederación hidrográfica del rio Segura* (1965). Reedición del colegio de Ingenieros de la Región de Murcia.
- Martin-Vide, J. & Lopez-Bustins, J. A. (2006). The Western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.,* 26, 1455-1475. https://doi.org/10.1002/joc.1388
- Noticias de Geodinámica Externa, 2019 (1.1), Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.
- Núñez Mora, J. A. (2019). *Análisis Meteorológico y Climático Temporal de Precipitaciones Torrenciales septiembre de 2019 en la Comunidad Valenciana*. AEMET en la Comunidad Valenciana.
- Olcina Cantos, J. y Díez-Herrero, A. (2017). Cartografía de inundaciones en España. Flood maps in Spain. *Estudios Geográficos*, LXXVIII, 282, pp. 283-315.
- *Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones* (2011). https://www.boe.es/boe/dias/2011/09/01/pdfs/BOE-A-2011-14277.pdf
- Riosalido, R., Rivera, A. & Martin, F. (2006). Development of a mesoscale convective system in the Spanish Mediterranean Area. *Atmospheric Research*, 227, 147-156.

- UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2015a). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*. http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf.
- UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2015b). *Making cities resilient: My city is getting ready*. http://www.unisdr.org/campaign/resilientcities

REVISIÓN DE LOS EVENTOS MÁXIMOS DIARIOS DE PRECIPITACIÓN EN EL DOMINIO CLIMÁTICO DE LA MARINA ALTA Y LA MARINA BAJA (ALICANTE)

Javier Valdés Abellán
javier.valdes@ua.es
https://orcid.org/0000-0003-3570-4983

Mauricio Úbeda Müller
mauricio.ubeda@ua.es

Departamento de Ingeniera Civil, Universidad de Alicante, España

RESUMEN

La caracterización del régimen extremal de precipitaciones de una determinada región, depende de un conjunto de variables que intervienen en la definición de región homogénea. Este hecho hace que la definición de región homogénea nos dirija al uso de herramientas y técnicas de análisis multivariable. Entre las alternativas actualmente más aceptadas en el campo de la identificación de regiones homogéneas, podemos hablar de las técnicas de clusterización o el análisis de componentes principales. En este trabajo se ha optado por la aplicación de la metodología de Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre las variables originales estandarizadas, identificando aquellas direcciones con una menor varianza. Para ello se analizaron 19 índices climáticos extremales relacionados con la precipitación máxima diaria de un total de 287 estaciones de AEMET, ubicadas en la Comunidad Valenciana, con registros mayores de 30 años. La región homogénea obtenida consta de 99 estaciones a las que se aplicó el test de discordancia de Hosking y Wallis. El resultado final ha sido la definición de una región homogénea con 90 estaciones y un total de 3.346 registros. Tal y como ha quedado demostrado en estudios previos (Francés, 1998), el régimen de lluvia extremales del levante peninsular presenta una particularidad basada en la presencia de dos poblaciones diferentes asociadas, por lo que la función elegida para realizar el ajuste fue la Two-Component Extreme Value (TCEV). El ajuste de esta distribución precisa de series de gran longitud que incorporen valores de ambas poblaciones, por lo que, en la región homogénea antes definida, se ha realizado un Ajuste Regional de Frecuencias (ARF), utilizando la variable regional. La definición de atípico se realizó mediante el test de Grubbs. El ajuste de las probabilidades empíricas de la variable regional a la distribución TCEV, ha permitido la cuantificación de los cuantiles correspondientes a altos periodos de retorno de dicha variable, lo que a su vez permite la obtención de los cuantiles locales asociados. Como conclusión del trabajo se obtiene un mapa con los valores locales de la precipitacion maxima diaria correspondientes a un periodo de retorno de 100 años.

1. INTRODUCCIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

El Ministerio de Fomento en su publicación Máximas lluvias diarias en la España peninsular (1999), realiza un análisis regional de las series anuales de máximas lluvias diarias. Para ello divide la Península en regiones homogéneas y considera el Levante peninsular como una única región homogénea, la 0801, con un coeficiente de variación de la variable estadística de precipitación máxima diaria anual mayor de 0.52. En el análisis regional de frecuencias se utiliza la variable

regional conocida como índice de avenida, y se considera, que la distribución de frecuencias que mejor ajusta esta variable en la región 0801 es la SQRT-ET-max de tres variables.



Figura 1. Diferentes regiones climáticas según el estudio de Máximas lluvias diarias en la España peninsular (1999).

Posteriormente en la Memoria Técnica que acompaña la elaboración del Mapa de Caudales Máximos (CEDEX, 2011), se modifica la delimitación anterior, diferenciando dos zonas al norte y sur del rio Algar, regiones 82 y 72. Este trabajo de no introduce cambio alguno en cuanto a la distribución de frecuencias de las precipitaciones máximas, y se limita a señalar que, en el Levante peninsular, para cuencas menores de 50 Km^2 de superficie, no se puede aplicar el método racional para el cálculo de caudales punta y para periodos de retorno mayores a 25 años. De esta forma la aplicación informática CAUMAX (versión mayo 2014), fruto del trabajo de Mapa de Caudales Máximos (CEDEX, 2011), no provee de valores de precipitación máxima diaria en las regiones 72 y 82 para los cuantiles asociados a los periodos de retorno mayores de 25 años.



Figura 2. Diferentes regiones climáticamente homogéneas según CEDEX (2011).

Este estudio del CEDEX (2011) introduce, en el cálculo de los caudales máximos, una distribución de 4 variables, la Two-Component Extreme Value (TCEV) (Rossi et al., 1984), que como veremos

más adelante, representa mejor el comportamiento de generación de avenidas en el Levante peninsular. La distribución TCEV de 4 variables necesita para su ajuste un largo registro que incorpore datos atípicos (llamamos valores atípicos, a los registros que pertenecen a la población representada por la segunda rama de la TCEV). Su ajuste local se realiza de forma independiente para cada una de las ramas.

Dado que los registros de caudales no son abundantes, los valores atípicos necesarios para ajustar la segunda rama correspondiente a los valores extraordinarios de alto periodo de retorno hacen uso de datos históricos no sistemáticos (Francés, 1998). La figura 3 muestra el ajuste en la Memoria Técnica que acompaña la elaboración del Mapa de Caudales Máximos (CEDEX junio, 2011), correspondiente al rio Júcar en la Estación de Huerto de Mulet. En esta figura 3 puede observarse como la práctica totalidad de los datos correspondientes al segundo tramo de la curva ajustada se corresponde con valores procedentes de información histórica de avenidas. A partir de estos ajustes locales, se calculan los caudales máximos para cuencas mayores de 50 Km^2, la primera rama se ajusta a partir de datos locales obtenidos por métodos hidrometereológicos, y la segunda rama se ajusta mediante un análisis regional que incluye un estudio para correlacionar los parámetros de la segunda y primera rama.

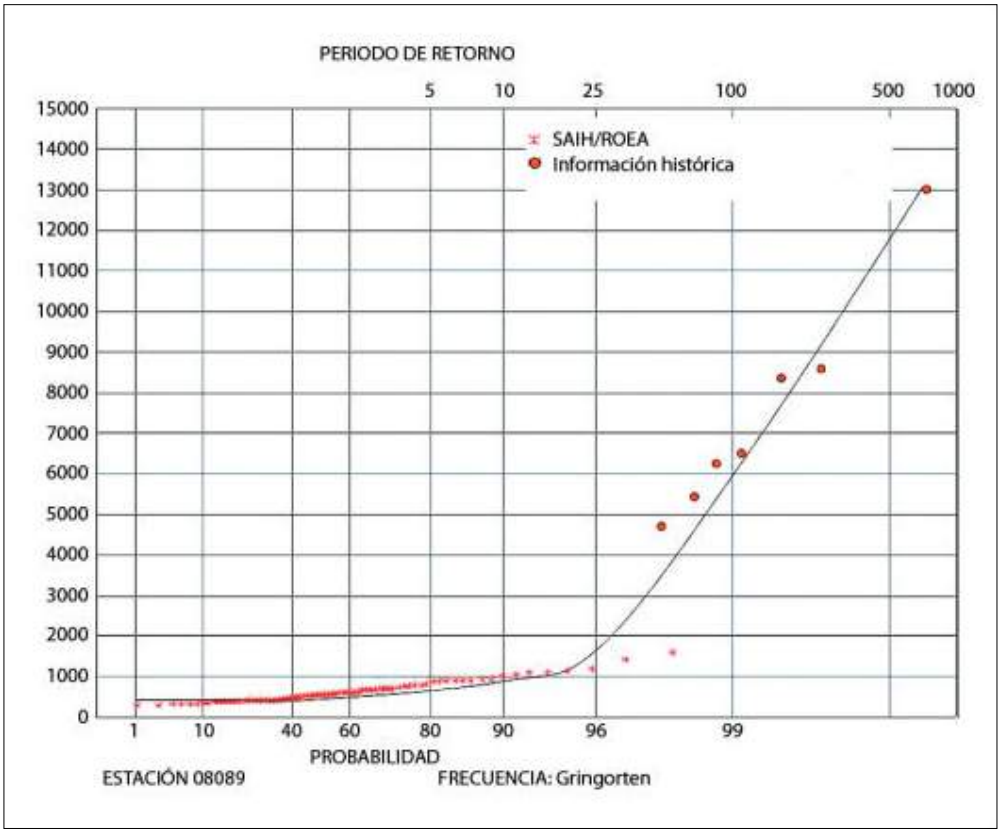


Figura 3. Caudales (en m^3/s) observados mediante el sistema SAIH y procedentes de información histórica y su ajuste mediante una función TCEV. Fuente: Memoria Técnica que acompaña la elaboración del Mapa de Caudales Máximos (CEDEX, 2011).

Es conocido que en el Levante peninsular, tal y como ha quedado demostrado en estudios previos (Francés, 1998), el clima mediterráneo ibérico presenta una particularidad basada en la presencia de dos poblaciones diferentes de lluvias asociadas a los periodos extraordinarios, que se representan adecuadamente por las dos ramas de la distribución TCEV, por lo que la utilización de la SQRT-ET-max, no permite, para periodos de retorno mayores 25 años, un correcto ajuste de las precipitaciones máximas.

En efecto, los registros de la estación de AEMET con mayor número de años en la provincia: Ciudad Jardín de Alicante (8025), determinan unas probabilidades empíricas de no superación, sensiblemente diferentes a las estimadas por la distribución SQRT-ET-max. La figura 4 incluye el ajuste local de la estación, según el mapa de Precipitaciones Máximas en la España peninsular y los dos valores atípicos detectados, producidos en 1982 y 997. Evidentemente el ajuste estadístico del Mapa de precipitaciones máximas en la España peninsular no es correcto en el caso de Alicante, ya que si en un periodo de 150 años de registros, dos superan los 220 mm/d, el periodo de retorno de esa lluvia seria del orden de 75 años y no de más de 500 como indica la gráfica.

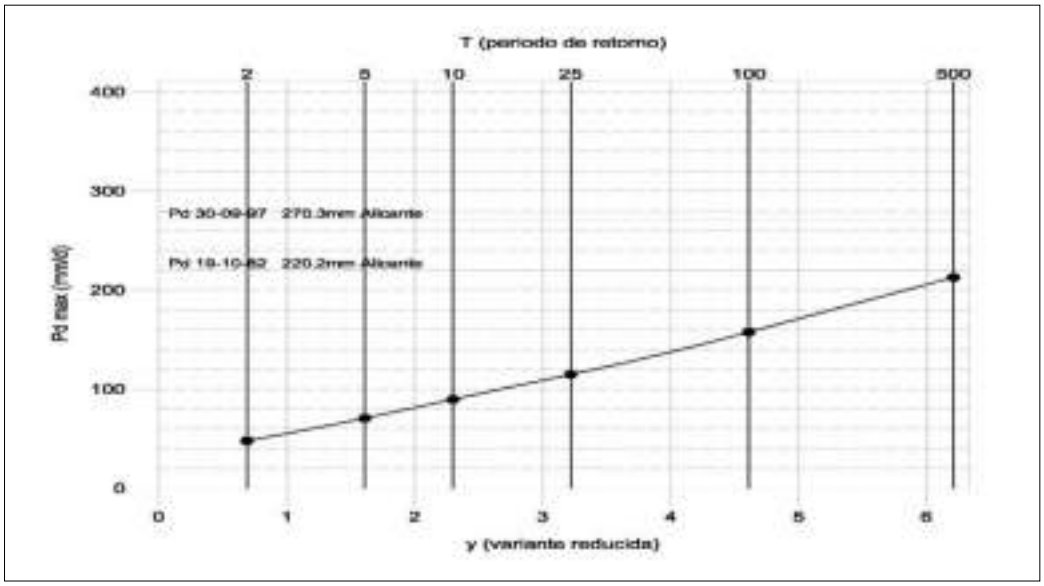


Figura 4. Correlación entre los valores atípicos de la Precipitación diaria máxima y los cuantiles recogidos en el Mapa de Precipitaciones Maximas en Ciudad Jardín 8025 (Alicante). Fuente: M. Ubeda Muller. Apuntes de Trazado y Drenaje de Carreteras, del Grado en Ingeniería Civil EPSUA.

En la Memoria Técnica de los trabajos realizados en 1998 por la UPV y la Conselleria de Obras Públicas (Machi Fellici, 2008), se descarta la distribución SQRT-ET-max y se introduce la distribución TCEV en el cálculo de los cuantiles de la precipitación máxima diaria para T=100 años y T =500 años. Este ajuste es posible porque la estación de Ciudad Jardín dispone de registros de 150 años y además contiene dos valores atípicos.

En la figura 5 observamos diversos ajustes en la estación de AEMET de Ciudad Jardín. Las funciones de probabilidad de Gumbel y SQRT-ET-max se alejan sensiblemente de las probabilidades empíricas. La distribución de probabilidad TCEV, varía en función del registro considerado, aunque su ajuste en todos los casos es mucho mejor que las anteriores. En el ajuste de 1997 se incorporaba el valor atípico que se produjo ese año, en el ajuste de 2015, se introducen 18 nuevos valores sin atípicos, por lo que, al disminuir la varianza de la segunda rama, disminuye el cuantil de 500 años, se mantiene el cuantil de 100 años y aumenta el cuantil de 25 años.

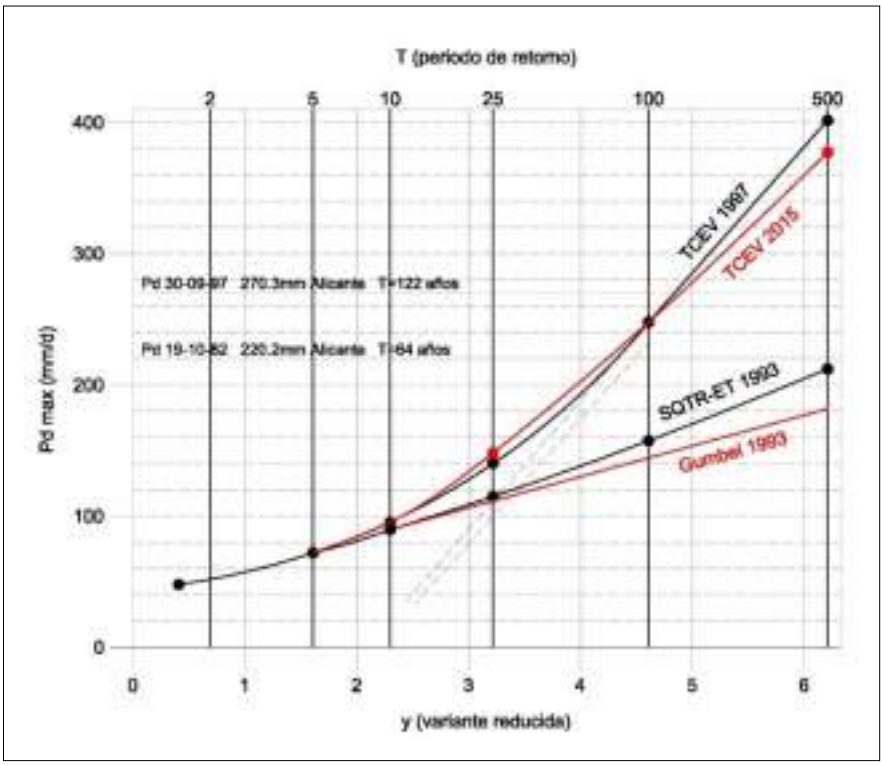


Figura 5. Diversas series de Precipitación diaria máxima registradas en la estación de Ciudad Jardín (8025 Alicante) ajustados mediante diversas funciones de distribución. Fuente: M. Ubeda Muller. Apuntes de Trazado y Drenaje de Carreteras, del Grado en Ingeniería Civil EPSUA.

En el resto de estaciones de la región, con menor longitud de registros o sin observaciones atípicas entre su serie registrada, no es posible realizar el ajuste local de una distribución TCEV correctamente o en caso de realizarse, debe asumirse que las inferencias para periodos de retorno altos pueden no ser correctas. En estos casos, debe recurrirse a un Análisis Regional de Frecuencias (ARF) con objeto de obtener unas inferencias correctas.

En el análisis regional, la falta de información asociada a localizaciones concretas es contrarrestada con la información disponible en las estaciones de toda la región homogénea, las cuales presentan un comportamiento hidrológico similar. En este sentido el análisis regional de precipitaciones máximas es más robusto que el de caudales máximos, ya que estos dependen de factores locales, como la pendiente y la permeabilidad de la cuenca, variables que son más difíciles de regionalizar.

Para realizar el ARF, es necesario definir en primer lugar una región homogénea y una variable regional. De esta forma se incrementa sensiblemente la longitud de las series disponibles, además de integrar en una única estación virtual los atípicos de toda la región, lo que permite ajustar una distribución como la TCEV a la variable regional.

En los trabajos realizados por la CHJ y la UPV para la evaluación del riesgo de inundación en las comarcas de Las Marinas en Alicante (CHJ, 2013a; CHJ, 2013b) se realizó el cálculo de los cuantiles de precipitación diaria máxima anual, para diversos períodos de retorno, mediante un análisis regional que cubría los límites administrativos de las comarcas de la Marina Alta y Marina Baja, ignorando otros criterios más objetivos a la hora de definir la región climática homogénea. De las diferentes distribuciones estudiadas, se consideró que la que mejor se ajustaba era la TCEV. De los estudios anteriores, se puede considerar que la distribución estadística que mejor se ajusta al régimen de lluvias máximas en el Levante peninsular es la TCEV, para cuyo ajuste, dada la escasa longitud de registros

y atípicos, es necesario realizar un Análisis Regional de Frecuencias (ARF), para lo que hay que delimitar previamente una región homogénea y verificar que las estaciones interiores geográficamente a la misma no son discordantes debido a errores o efectos de carácter local.

Ajustada la distribución de la variable regional de la estación regional, y calculados sus cuantiles para diversos periodos de retorno, se calculan los cuantiles locales, mediante una transformación inversa. El cálculo de los cuantiles locales de la precipitación máxima diaria para periodos de retorno de 100 años y 500 años es necesario para el diseño de obras de drenaje transversal de cuencas de tamaño medio, en las que se utilizan modelos hidrometereológicos para la estimación de los caudales máximos.

En el Levante peninsular no se dispone, de forma generalizada, de los valores de los cuantiles más elevados de las precipitaciones máximas diarias, por lo que se recurre, para el cálculo de los caudales máximos de cuencas de tamaño medio, a extrapolar los datos de los caudales obtenidos en grandes cuencas. En la Memoria Técnica que acompaña la elaboración del Mapa de Caudales Máximos (CEDEX junio, 2011), al utilizarse la distribución SQRT-ET-max, se limita, en las regiones 72 y 82, el cálculo hidrometereológico a la primera rama de la distribución, ajustándose la segunda rama mediante un análisis regional que incluye la estimación por regresión de su parámetro de posición. Sin embargo, en las cuencas mayores de 500 Km^2 el análisis de regresión, sí que se extiende a toda la serie, lo que puede generar incertidumbres en la estimación de los cuantiles más elevados.

Su aplicación práctica genera caudales irreales y excesivamente elevados. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es realizar una revisión de los eventos máximos diarios en la región homogénea desde el punto de vista del clima que incluya la función TCEV y todos los episodios extraordinarios de precipitación producidos en los últimos años.

2. METODOLOGÍA

2.1. Información meteorológica

La información pluviométrica de partida fue facilitada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se trabajó con datos de precipitación diaria, obtenidas en intervalos de 24 h con comienzo y fin a las 7 h de cada día.

En principio y puesto que inicialmente se desconocía el alcance de la región homogénea, se trabajó con la información procedente de toda la Comunidad Valenciana. Una vez definida la región, el proceso continuó exclusivamente con las estaciones localizadas en el interior de la región homogénea. El número de estaciones inicial fue de 712 estaciones con longitudes temporales muy variables y por lo general escasa para los objetivos planteados en este estudio (el valor promedio de número de años completos era inferior a 20 años). Posteriormente se descartaron los datos procedentes de estaciones con un registro inferior a 20 años completos, reduciéndose el número total de estaciones estudiadas a 287 y aumentando su longitud media a más de 37 años completos. La distribución espacial de las estaciones analizadas aparece recogida en la figura 6.



Figura 6. Localización de las estaciones consideradas en el estudio.

2.2. Caracterización de los eventos extremos de precipitación

Con objeto de caracterizar el régimen de precipitación extremo de una región, no es suficiente con observar y analizar la variable de precipitación máxima en 24h, pese a ser este índice estadístico el de uso más extendido. En un trabajo conjunto de la Comisión de Climatología de la Organización Mundial Meteorológica (CCI), del proyecto Clima y Océano: variabilidad, predictibilidad y cambios (CLIVAR-WCRP) y el equipo de Expertos en la detección e índices del cambio climático (ETCCDI) (Karl et al., 1999) se definió un conjunto de 27 índices climáticos extremales basados en información diaria de temperatura y precipitación. Estos índices han sido aplicados posteriormente en multitud de investigaciones posteriores sobre el clima, tanto en su caracterización como en el estudio de un potencial cambio (Manton et al., 2001; Wang and Zhou, 2005; Zhang et al., 2005; Zhang et al., 2011). De entre estos 27 índices, en el presente trabajo se seleccionaron los 12 índices relacionados con la precipitación, los cuales vienen recogidos en la tabla 1.

Nombre	Definición	Uds
Ptot	Precipitación total anual en días húmedos (precipitación ≥ 1 mm)	mm
R1d	Precipitación diaria máxima anual	mm
R5d	Precipitación máxima anual en 5 días consecutivos	mm
R95	Precipitación total anual en días muy húmedos (precipitación > percentil 95)	mm
R99	Precipitación total anual en días extremadamente húmedos (precipitación > percentil 99)	mm
SDII	Precipitación total anual dividido entre el número de días húmedos	$mm \cdot d^{-1}$
R10	Número de días anual con precipitación superior o igual a 10 mm	d
R20	Número de días anual con precipitación superior o igual a 20 mm	d
CWD	Máximo número de días húmedos (precipitación ≥ 1 mm) consecutivos	d
CDD	Máximo número de días no húmedos (precipitación < 1 mm) consecutivos	d
R95PTOT	Porcentaje de la precipitación anual total precipitada en días muy húmedos (precipitación > percentil 95)	%
R99PTOT	Porcentaje de la precipitación anual total precipitada en días extremadamente húmedos (precipitación > percentil 99)	%

Tabla 1. Definición de los 12 índices de precipitación extremal empleados, junto con una breve descripción y sus unidades.

Adicionalmente, y como elemento diferenciador en este trabajo con respecto a estudios previos como Santos et al (2017), se consideró también entre los descriptores e índices a considerar en la caracterización del régimen de precipitación extremal la altitud de la estación, los L-momentos de segundo, tercer y cuarto orden obtenidos de forma adimensional y finalmente los parámetros de la función de distribución de Gumbel obtenidos mediante el método de la máxima verosimilitud una vez han sido excluidos los valores atípicos (tabla 2). Estos estadísticos fueron obtenidos a partir de la muestra de R1d (precipitación diaria máxima anual) para cada estación y su inclusión en el análisis PCA se justifica en que podrían llegar a ser elementos que introdujesen una caracterización más acertada de las regiones homogéneas.

Los L-momentos son combinaciones lineales de los momentos ponderados probabilísticamente y fueron introducidos por Greenwood et al (1979). Son especialmente útiles los momentos lineales de 1º orden, λ_1, que se corresponde con la media), el de 2º orden, λ_2, que mide la escala de la distribución indicando el grado de dispersión de los datos; el de 3º orden, λ_3, que hace referencia a la asimetría y el de 4º orden, λ_4, que indica el apuntamiento o kurtosis de la distribución.

Nombre	Definición	Uds
Alt	Altitud de la estación	m
L-Cv	L-Momento de 2º orden adimensional	-
L-Cs	L-Momento de 3º orden adimensional	-
L-Ck	L-Momento de 4º orden adimensional	-
parGum1	Parámetro de localización de la función de distribución de Gumbel	mm/d
parGum2	Parámetro de dispersión de la función de distribución de Gumbel	mm/d

Tabla 2. Definición de los parámetros adicionales considerados en el presente trabajo para la caracterización extremal de la precipitación.

Con objeto de poder establecer comparaciones entre diferentes estaciones de cara a una futura definición de región homogénea, resulta imprescindible definir los L-momentos de forma adimensional (τ_2, τ_3 y τ_4) y para ello se calculan los cocientes de momentos lineales, dividiendo el momento de 2º orden entre la media y los de mayor orden entre la medida de la escala (Hosking and Wallis, 1997) según las ecuaciones siguientes:

$$L-Cv=\tau_2=\frac{\lambda_2}{\lambda_1};\quad L-Cs=\tau_3=\frac{\lambda_3}{\lambda_2};\quad L-Ck=\tau_4=\frac{\lambda_4}{\lambda_2}$$

En cuanto a los valores parGum1 y paGum2, éstos se corresponden respectivamente con los parámetros μ y σ de la función de distribución de Gumbel (Gumbel, 1958) expresada del siguiente modo:

$$F(x)=e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\sigma}}}$$

Estos parámetros fueron calculados sobre una muestra con ausencia de valores atípicos siguiente la metodología descrita y seguida por Fiorentino et al (1985) o por Frances (1997), realizando por tanto un ajuste a los eventos extraordinarios de bajo periodo de retorno. La detección de estos valores atípicos se realizó mediante un proceso iterativo siguiente la metodología descrita en Grubbs et al (1969).

2.3. Definición de región homogénea

La definición de regiones homogéneas desde un punto de vista climático es un proceso complejo y carente de una única alternativa en cuanto a la metodología universalmente aceptada lo que lleva aparejado, por tanto, la inclusión en el proceso de definición de región homogénea de decisiones que pueden ser consideradas subjetivas. Estos hechos no hacen sino agravarse cuando lo que se pretende no es definir la región homogénea desde un punto de vista del clima en su conjunto (precipitación, temperatura, vientos, etc), ni siquiera del régimen de precipitaciones en general sino, particularmente, desde el punto de vista del régimen de precipitación extremal.

Como se ha descrito en el apartado anterior, la caracterización del régimen extremal de precipitaciones de una determinada región no depende del valor de un único parámetro, sino que depende de un conjunto de variables, todas ellas intervinientes en la definición de región homogénea. Este hecho hace que la definición de región homogénea nos dirija al uso de herramientas y técnicas de análisis multivariable.

De la observación de la literatura científica sobre el tema, se observa que existe una gran variedad de alternativas metodológicas. La delimitación de regiones según áreas administrativas, pese a parecer incoherente desde el punto de vista climática es una opción que ha sido utilizada (BEABLE, 1982). Trabajos como el de SCHAEFER (1990) donde se definió la región en base a decisiones subjetivas de las características físicas de las regiones dando resultados aceptables ponen de manifiesto que no puede obviarse la presencia de descriptores entre las diferentes variables consideradas. A pesar de ello, las anteriores alternativas deben ser descartadas bajo el punto de vista de los autores, bien por falta de justificación física o bien por ignorar índices de precipitación importantes en la identificación de regiones como ha quedado demostrado en estudios posteriores (Santos et al., 2017). Además, no debe olvidarse el alto valor de subjetividad que presentan estos métodos y que, por tanto, impiden una aplicación objetiva en otras áreas de estudio diferentes a las que fueron aplicados inicialmente.

Entre las alternativas actualmente más aceptadas en el campo de la identificación de regiones homogéneas, podemos hablar de las técnicas de clusterización o el análisis de componentes

principales. Ambas opciones están preparadas para poder trabajar con información recogida en multitud de variables, las cuales se agrupan en vectores de n dimensiones (tantas como índices más descriptores hayan sido considerados) que son asociados a cada una de las estaciones analizadas. En este trabajo se ha optado por la aplicación de la metodología de Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre las variables originales, metodología que es explicada en la siguiente sección con más detalle.

2.4. Análisis de Componentes Principales

El PCA es una técnica estadística muy extendida en el análisis de información multivariante y pueden encontrarse en la literatura científica buenos y muy completos desarrollos como por ejemplo en Jolliffe (2002). En estos casos, la información se encuentra contenida en una serie de variables. El elevado número de variables iniciales da lugar a un espacio muestral con muchas dimensiones que tiene como consecuencia una complejidad a la hora de poder extraer conclusiones y poder realizar inferencias. En estas situaciones, la aplicación de la técnica del PCA permite encontrar un número de nuevas componentes subyacentes (i.e., las componentes principales) con objeto de explicar la misma varianza inicialmente explicada en un alto número de variables, pero agrupada o condensada en un número menor. A partir de estas nuevas componentes explicativas puede incluso aplicarse técnicas de agrupamiento o clusterización con lo que ambas opciones antes descritas pueden llegar a considerarse como complementarias. La técnica de PCA ha sido aplicada en múltiples ocasiones en el ámbito de la climatología y más particularmente de la precipitación en diferentes regiones (Almazroui et al., 2015; Aravena and Luckman, 2009; Jones et al., 2014).

En el presente trabajo se aplicó la técnica de PCA sobre los 12 índices recogidos y descritos previamente en la tabla 1; y de manera alternativa sobre los 19 índices que engloban los 12 previos más los 7 adicionales recogidos en la tabla 2. El objetivo de estudiar ambas opciones fue valorar si la inclusión de las 7 variables adicionales podía mejorar la definición de región y la obtención de una primera componente con una mayor capacidad descriptiva de la varianza tras la aplicación de la PCA.

En ambos casos, se trabajó con las variables originales estandarizadas, es decir, con media cero y desviación estándar igual a 1. Esto es así, porque el proceso de PCA identifica aquellas direcciones en las que la varianza es mayor de entre todas las variables incluidas en el análisis. Como la varianza de una variable se mide en su misma escala elevada al cuadrado, si no se estandariza las variables de manera previa, aquellas variables cuya escala sea mayor dominarán al resto y el resultado informará sobre la predominancia de una variable con respecto a otras que puede no ser cierta y responder únicamente a que dicha variable presenta una escala mayor que el resto.

La definición de los límites de la región homogénea se correspondió con la isolínea de valor cero correspondiente a la primera componente principal. Para ello fue necesario realizar una extrapolación espacial desde los puntos donde existían datos (las estaciones meteorológicas) al resto del territorio. Para tal fin se utilizó un kriging ordinario con una función tipo exponencial para explicar el variograma. La alternativa del kriging como método de interpolación espacial está considerada como una de las mejores opciones y su uso está más que difundido entre la literatura científica en todos los ámbitos, además del climático.

2.5. Identificación de estaciones discordantes

Definida la región, se realizó un test con objeto de identificar las estaciones cuya información es discordante con el grupo. La medida de la discordancia (D) se realizó en base al análisis de los valores de los L-momentos según una metodología expuesta en Hosking y Wallis (1997). En este caso, la medida de D se fundamenta en la representación de los valores de los L-Momentos adimensionales (τ_2, τ_3 y τ_4) en un gráfico de tres dimensiones. Se considera como puntos discordantes aquellos que se alejan excesivamente de los valores medios definidos por la nube del conjunto de puntos.

Por distancia excesiva se considera si el valor de la discordancia de una estación, D_i, es superior a un valor tabulado que depende del número de puntos de la nube. Para el caso de que el número de puntos (estaciones en el presente trabajo) sea superior a 15 el valor que determina aquellas estaciones discordantes es 3 (Hosking and Wallis, 1997).

En la aplicación de este test, la importancia de cada estación a la hora de posicionar el centroide en este espacio de tres dimensiones definido por el vector de posición (τ_2, τ_3, τ_4) fue ponderado de acuerdo a la longitud total de la serie, de modo que aquellas estaciones con un periodo de observación más largo obtuvieron una mayor importancia que aquellas estaciones con periodos de observación más corto.

2.6 Regionalización de la precipitación y ajuste a una TCEV

La información de R1d (precipitación diaria máxima anual) procedente de las estaciones concordantes fue regionalizada atendiendo a la transformación que ya introdujo Fiorentino et al. en 1985 y que aparece descrita en la siguiente ecuación.

$$y_{reg,i,j} = -\frac{(x_{i,j} - \mu_j)}{\sigma_j}$$

Donde $y_{reg,i,j}$ se corresponde con el dato regionalizado $x_{i,j}$, el cual procede de la estación *j*, siendo μ_j y σ_j los parámetros de la función de distribución de Gumbel ajustada a una muestra que excluye los valores atípicos de dicha estación. *i* se corresponde con el número de observaciones existentes en la estación *j*.

La función elegida para realizar el ajuste fue la Two-Component Extreme Value (TCEV). Tal y como ha quedado demostrado en estudios previos (Francés, 1998), el clima mediterráneo ibérico presenta una particularidad basada en la presencia de dos poblaciones diferentes asociadas a los periodos extraordinarios; los eventos extraordinarios son originados por lluvias cuya génesis y evolución es diferente; unos corresponden a episodios meteorológicos de grandes frentes de precipitación y otros se corresponden con episodios de formación de tormentas de tipo convectivo. La frecuencia de aparición de los eventos extraordinarios del primer tipo es mayor que las del segundo, y la intensidad registrada en estos eventos es menor. Normalmente los eventos de precipitación máximo asociadas al tipo de precipitación frontal suelen aparecer en invierno y durante la primavera, mientras que las formaciones tormentosas de tipo convectivo son más comunes a finales de verano y principios del otoño, asociándose normalmente estos eventos extraordinarios a fenómenos de Depresión de presión atmosférica Aislada en Niveles Altos (DANA).

En estas situaciones, la función TCEV permite y así se ha demostrado en estudios previos (Rossi et al., 1984) una correcta adaptación de la función a ambas familias de eventos extraordinarios (los de gran y los de pequeño periodo de retorno) a través de sus cuatro parámetros.

La función TCEV es en realidad una combinación de dos funciones de Gumbel y su función de probabilidad acumulada responde a la siguiente expresión:

$$F_{TCEV}(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu_1)}{\sigma_1}}} \cdot e^{-e^{-\frac{(x-\mu_2)}{\sigma_2}}}$$

donde las variables μ_1, σ_1, μ_2 y σ_2, se corresponde con los cuatro parámetros de forma de esta función.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de Componentes Principales y definición de la región homogénea

La aplicación de la técnica de PCA, en las dos opciones de 12 y 18 variables, permitió crear un nuevo conjunto de componentes. De estas, la primera componente fue capaz de explicar el 64.3 y el 52.9 % de la varianza de la muestra original en el caso de las opciones de 12 y 18 variables respectivamente.

La segunda componente principal explicó fue capaz de explicar el 15.5 y 18.1% en el mismo orden previo. En el caso del análisis con la opción de 12 variables, sólo 3 fueron suficientes para explicar más del 90% de la varianza de los datos originales, en el caso de la opción de 18 variables hizo falta 5 componentes para sobrepasar este límite del 90% de varianza explicada.

Si observamos la importancia de cada variable empleada en la configuración de la componente principal más importante (figura 7) veremos que prácticamente todos los 12 índices definidos por el proyecto antes comentado y considerados en el análisis tienen un peso similar, no pudiendo descartar prácticamente ninguno excepto el número de días consecutivos sin lluvia, el cual realmente es un indicador poco valioso para definir el régimen de torrencialidad de una región.

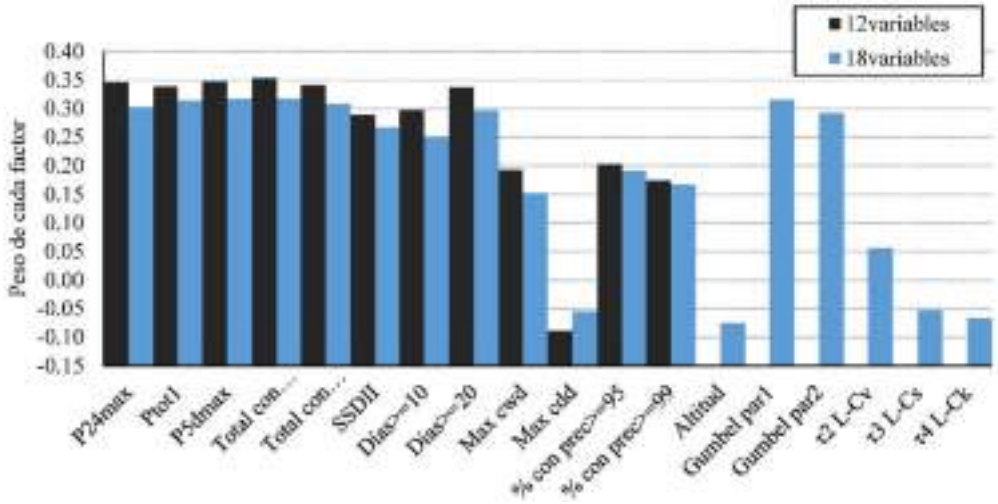


Figura 7. Definición de los parámetros considerados en el presente trabajo para la caracterización extremal de la precipitación. Para cada parámetro se incluye su peso correspondiente en la determinación de la primera componente.

El valor de la nueva componente principal de cada estación fue extrapolado espacialmente y la isolínea de valor cero, que marca la frontera de la región, fue obtenida con una y otra alternativa (figura 8). A la vista del resultado y de la práctica coincidencia de los límites de la región y de las estaciones meteorológicas que quedaban incluidas en la región se procedió a elegir la opción más sencilla, que fue exactamente la que utiliza los 12 índices y que hay ha sido utilizada en estudios previos (Santos et al., 2017).

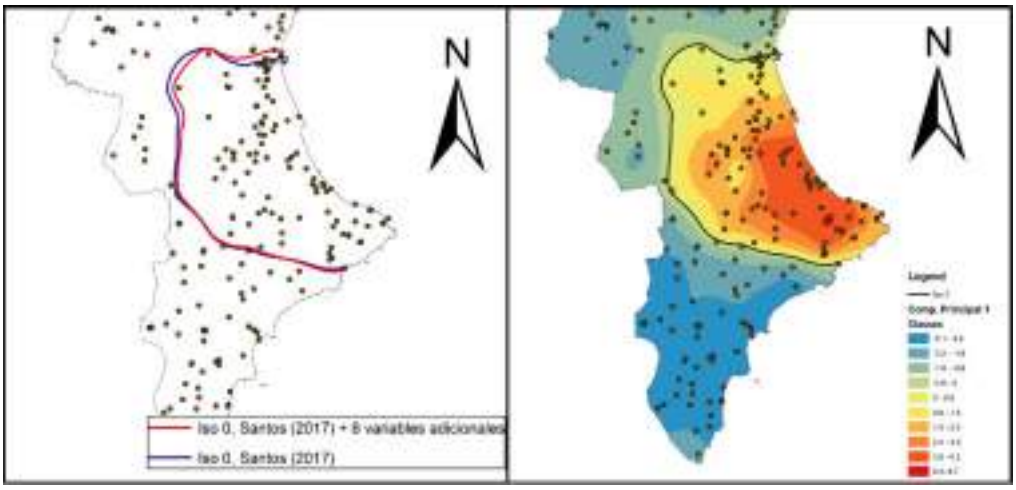


Figura 8. Sección izquierda: límites de la región homogénea considerando 12 (línea azul) o 18 índices (línea roja). Sección derecha: distribución espacial del valor de la primera componente principal en la zona de estudio.

La definición de los límites de la región permitió identificar un total de 99 estaciones en ubicada en el interior de la misma.

Como se observa, la región parte del golfo de Altea y se adentra siguiendo aproximadamente una línea recta hasta la ciudad de Alcoy. A partir de ese punto la línea sigue aproximadamente las estribaciones de los relieves montañosos más importantes como todo el relieve montañoso situado entre el valle de Cofrentes y las comarcas de la Ribera. Nótese que la presencia de las diferentes sierras ubicadas entre Alcoy y esta zona próxima a Enguera no distorsionan la posición de la frontera de la región. Justamente estas sierras como la sierra Grossa al norte de Ontinyent o la sierra del Benicadell tienen unas alineaciones NE-SO que no interfieren significativamente en el movimiento de los temporales procedentes del NE y que suelen estar asociados a los procesos lluviosos más importantes en la región.

Alcanzada la planicie definida por las comarcas de la Ribera, la Safor y L´Horta la región continúa siendo homogénea y no sufre variaciones hasta alcanzar justamente la ciudad de Valencia.

Una vez definida la región se aplicó el test de discordancia de Hosking y Wallis (1997) con objeto de eliminar las estaciones que pudiesen presentar valores discordantes con respecto a la media. El resultado de la aplicación de este test produjo como resultado la eliminación de 9 de las 99 estaciones ubicadas en la región en un proceso de 4 iteraciones hasta alcanzar un estado en que todas las estaciones consideradas eran concordantes entre sí.

3.2. Ajuste función TCEV y obtención de valores regionalizados de las observaciones R1d

Una vez definida los límites de la región homogénea y las estaciones concordantes, se procedió a transformar las observaciones de estas estaciones homogéneas en una variable regionalizada.

La variable regionalizada fue obtenida mediante la transformación mostrada en la sección 2.5 de este documento, que hace uso de los parámetros de forma de la función de Gumbel ajustados a la muestra de observaciones de cada estación habiendo sido excluidos previamente todas las observaciones atípicas. La definición de atípico se realizó mediante el test de Grubbs. Se obtuvo con este proceso una muestra de 3346 valores considerando el conjunto de estaciones de la región.

La figura 9 muestra la curva de frecuencias acumuladas asociadas al valor regional de la variable de precipitación diaria máxima anual. En esta misma figura 9 se han superpuesto 5 líneas rojas

correspondientes a los cuantiles asociados a los periodos de retorno de 25, 50, 100, 200 y 500 años. Como se puede observar, si el objetivo del estudio es inferir valores extremales asociados a altos periodos de retorno, la configuración actual de la figura 9 es inadecuada ya que la zona de interés se sitúa en una zona marginal del gráfico.

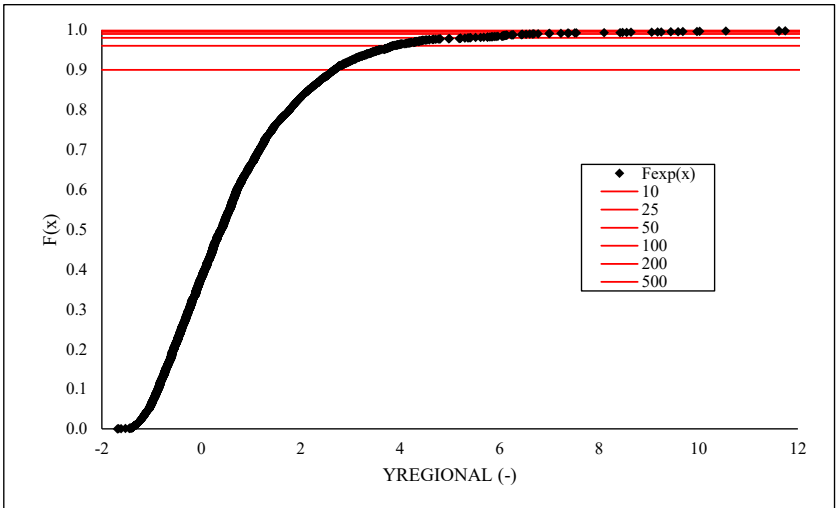


Figura 9. Valores de probabilidad acumulados asociados a la variable regional del índice de precipitación máxima anual para la región homogénea.

Para solucionar este hecho,se procede a realizar la transformación siguiente en el eje de ordenadas:

$$-\ln(-\ln(F(x)))$$

Mediante esta transformación la figura 9 queda transformada en la figura 10. Se observa en esta nueva figura 10 como la zona de interés asociada a periodos de retorno superiores a 10 años (valor de F(x) superiores a 0.9 y valores de –ln(-ln(Fx))) superiores a 2.25) se expande en comparación a la zona de valores inferiores a los anteriores, que resulta contraída.

Asimismo, mediante esta transformación se consigue que la función de probabilidad de Gumbel aparezca como una recta, y por tanto en caso de que la muestra analizada no siga esta función podrá ser fácilmente identificado. En este caso se observa como claramente se produce un cambio en la tendencia lineal aproximadamente de los valores observados en valores cercanos al periodo de retorno de 50 años (–ln(-ln(Fx))) igual a 3.90). Este hecho pone de manifiesto la presencia de dos familias de eventos extraordinarios, aquellos con periodo de retorno inferior a 50 años y aquellos con periodo de retorno superior a este valor frontera.

Además, esta particular forma de las probabilidades observadas pone de manifiesto el error cometido en caso de emplear la función de Gumbel en esta zona, ya que un ajuste lineal de los datos observados forzosamente dará lugar a valores estimados inferiores a los observados para el caso de periodos de retorno alto, siendo por tanto insuficiente cualquier diseño basado en estos datos hidrológicos.

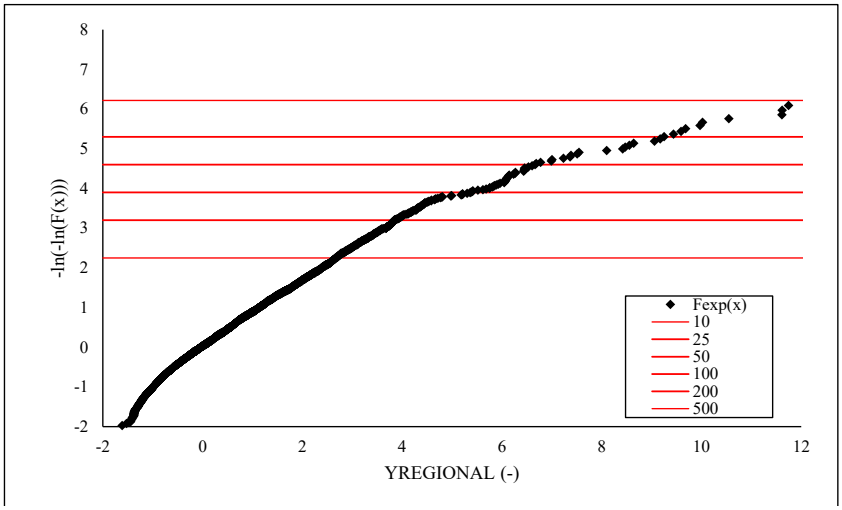


Figura 10. Valores de probabilidad acumulados transformados mediante doble logaritmo asociados a la variable regional del índice de precipitación máxima anual para la región homogénea.

La bondad del empleo de la función TCEV es justamamente su flexibilidad para adaptarse a estas formas no rectas. La figura 11 muestra justamente el ajuste realizado a dicha muestra mediante las dos funciones comentadas de Gumbel y TCEV. El ajuste se realizó mediante los métodos de máxima verosimilitud y mediante minimización de una función objetivo definida como el error cuadrático medio entre las observaciones y las predicciones de la variable transformada. La definición del error cuadrático medio en base a la variable transformada (–ln(-ln(Fx))) y no en base a la probabilidad acumulada directa se realizó con objeto de primar un mejor ajuste en la zona de interés, considerada como la zona asociada a periodos de retorno superiores a 10 años e identificada en las figuras con la zona ubicada por encima de la primera línea roja (valor de 2.25).

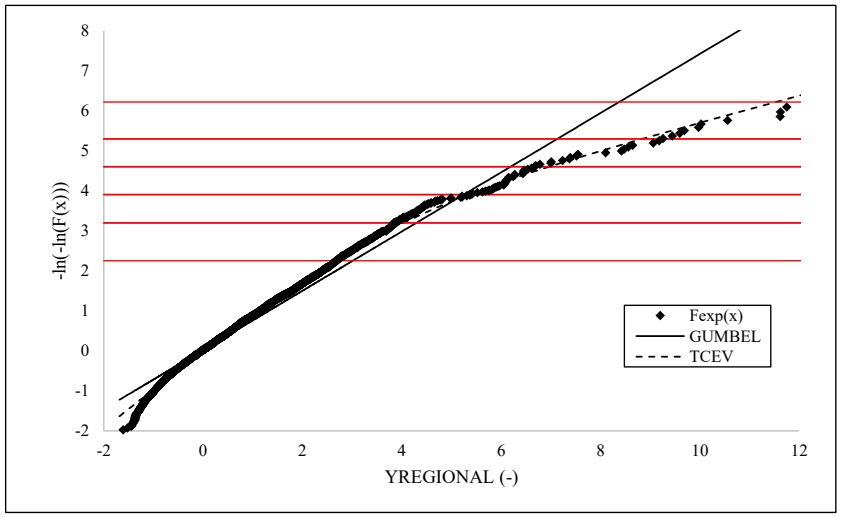


Figura 11. Valores de probabilidad acumulados transformados mediante doble logaritmo asociados a la variable regional del índice de precipitación máxima anual para la región homogénea y funciones de Gumbel y TCEV ajustadas a dicha muestra.

Una vez conseguida la función ajustada, ya se pudo obtener el valor de la variable regional asociad a diferentes periodos de retorno (tabla 3).

Periodo de retorno	Valor estimado de la variable regional
10	2.64
25	3.67
50	5.34
100	6.96
200	8.85
500	11.52

Tabla 3. Definición de los parámetros adicionales considerados en el presente trabajo para la caracterización extremal de la precipitación.

2.4 Desregionalización de la variable ajustada y obtención de los mapas de precipitación máxima en 24h asociada a diferentes periodos de retorno

Obtenidos los valores reginales, se llevo a cabo un proceso de desregionalización, en la que a partir de los valores anteriores de valor regional asociado a unos periodos de retorno concretos, se obtuvo el valor de la R1D en cada una de las estaciones de la región asociado a esos mismos periodos de retorno.

La interpolación espacial de los valores de las diferentes estaciones al resto de la región, se realizó igual que ya se realizó con la interpolación de la componente principal dominante, mediante un kriging ordinario ajustando el variograma a una función exponencial.
La figura 12 muestra el mapa de precipitación diaria máxima asociada a un periodo de retorno de 100 años.

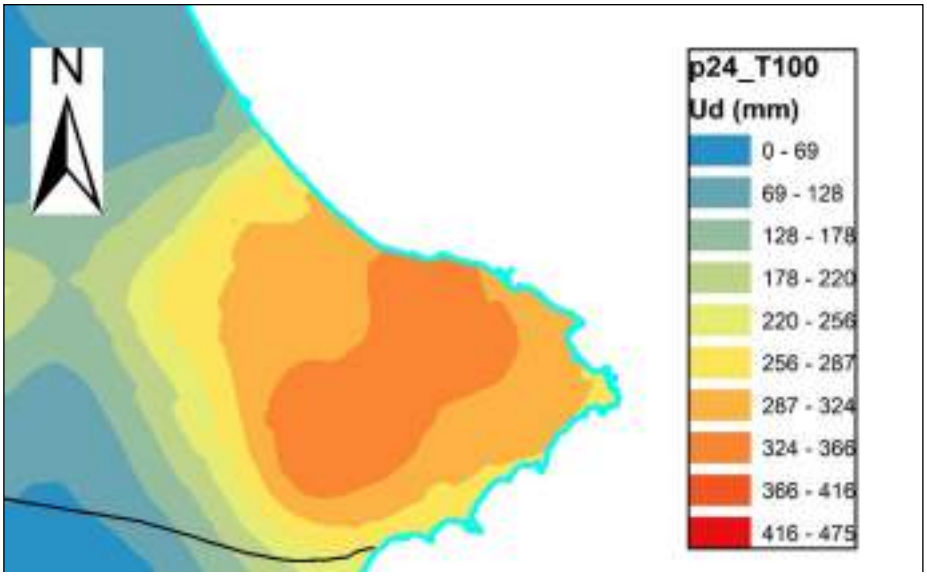


Figura 12. Definición de los parámetros adicionales considerados en el presente trabajo para la caracterización extremal de la precipitación.

Obsérvese que pese a que la zona con una misma homogeneidad y mayor valor de la componente principal (sección derecha de la figura 8) se extiende desde la comarca de la Marina Alta hasta prácticamente la ciudad de Cullera, no sucede así con los eventos de precipitación diaria máxima, los cuales están muy claramente concentrados en la comarca de la Marina Alta y en el sur de la comarca de la Safor. Esto es así porque aunque ambas zonas están identificadas con un mismo patrón de comportamiento regional, existe una diferencia de escala entre ambas.

Los valores de los cuantiles para este periodo de retorno de 100 años se sitúan en el entorno de los 400 mm para el estadístico de precipitación diaria máxima. Estos valores de precipitación diaria máxima decrecen rápidamente cuando nos alejamos tanto hacia el sur como hacia el norte. Puede asimismo observarse como los máximos valores de preciptiación se ubican en la zona perimetral de la región homogénea, justamente donde antes se ha comentado que se sitúan las estribaciones montañosas más importantes y con una mayor influencia en cuanto a la generación de procesos de precipitación con génesis convectiva, tan típicos de la región mediterránea.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo se indican a continuación:

- Los eventos de precipitación extrema en el Levante peninsular son una amenaza muy importante, con consecuencias catastróficas tanto economicas como desde el punto de vista de pérdida de vidas humanas. Esta amenza exige un rigor en el estudio y cuantificación de la misma, con objeto de planificar y gestionar adecuadamente los riesgos derivados de esta amenaza.
- El regimen de lluvias extremas, que se produce en el Levante peninsular, presenta dos poblaciones diferentes, cuya distribucion de frecuencias de no superación puede representarse mediante una única distribucion TCEV. Cada rama de la misma representa a cada una de las poblaciones.
- Para el ajuste de una distribucion TCEV, es fundamental disponer de una serie de registros suficientemente larga para que incorpore valores de ambas poblaciones. En la mayoria de las estaciones, las series no incorporan los valores atipicos necesarios para ajustar la segunda rama de la TCEV, por lo que hay que realizar un Ajuste Regional de Frecencias, que permita incorporar en una unica estacion regional todos los atipicos detectados.
- Para realizar el ARF es necesario delimitar previamente una region homogenea, cuya delimitacion se desconoce a priori, por lo que es necesario recurrir a técnicas de clusterización. En este trabajo se ha optado por la aplicación de la metodología de Análisis de Componentes Principales (PCA).
- Delimitada la región homogénea, se realiza un análisis para rechazar aquellas estaciones discordantes debido a errores o efectos locales y se realiza el ajuste de la distribución TCEV de la variable regional que permite calcular los cuantiles locales.
- El cálculo de los cuantiles locales permite realizar el cálculo por métodos hidrometereológicos, de los caudales máximos asociados a cada cuantil de precipitación.

REFERENCIAS

- Almazroui, M., Dambul, R., Islam, M. N. & Jones, P. D. (2015). Principal components-based regionalization of the Saudi Arabian climate. *International Journal of Climatology*, 35, 2555-2573.
- Aravena, J. C. & Luckman, B. H. (2009). Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology*, 29, 2106-2120.
- CEDEX, C.d.E.y.E.d.O.P. (2011). *Mapa de caudales máximos. Memoria técnica*. Ministerio de Fomento, Madrid.
- CHJ, C.H.d.J. (2013a). *Plan Director de Defensa contra las Avendias. Comarca de la Marina Alta (Alicante)*. CHJ, Confederación Hidrográfica del Jucar, Valencia.
- CHJ, C.H.d.J. (2013b). *Plan director de defensa contra las avenidas en la comarca de la Marina Baja (Alicante)*. CHJ, Confederación Hidrográfica del Jucar, Valencia.
- Fiorentino, M., Versace, P. & Rossi, F. (1985). Regional flood frequency estimation using the two-component extreme value distribution. *Hydrological Sciences Journal*, 30, 51-64.

- Francés, F. (1998). Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12, 267-283.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C. & Wallis, J. R. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressable in inverse form. *Water Resources Research*, 15, 1049-1054.
- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, 11, 1-21.
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York.
- Hosking, J. R. M. & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer, New York.
- Jones, M. R., Blenkinsop, S., Fowler, H. J. & Kilsby, C. G. (2014). Objective classification of extreme rainfall regions for the UK and updated estimates of trends in regional extreme rainfall. *International Journal of Climatology*, 34, 751-765.
- Karl, T. R., Nicholls, N. & Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes - Workshop summary. *Climatic Change*, 42, 3-7.
- Machi Fellici, J. (2008). Plan contra inundaciones de Alicante y su área metropolitana. Generalitat Valenciana.
- Manton, M. J. et al. (2001). Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the south Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, 21, 269-284.
- Ministerio de Fomento (1999). Máximas lluvias diarias en la España peninsular. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Rossi, F., Fiorentino, M. & Versace, P. (1984). Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis. *Water Resources Research*, 20, 847-856.
- Santos, M., Fragoso, M. & Santos, J. A. (2017). Regionalization and susceptibility assessment to daily precipitation extremes in mainland Portugal. *Applied Geography*, 86, 128-138.
- Wang, Y. & Zhou, L. (2005). Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophysical Research Letters*, 32, 1-4.
- Zhang, X. et al. (2005). Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110, 1-12.
- Zhang, X. et al. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 851-870.

INUNDACIONES Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MEDITERRÁNEO

María del Carmen Llasat Botija
Departamento de Física Aplicada, Universidad de Barcelona, España
carmell@meteo.ub.edu
https://orcid.org/0000-0001-8720-4193

RESUMEN

El Mediterráneo se considera un "hot spot" del cambio climático, tanto por el gran impacto que éste va a tener sobre la región como por las notables incertidumbres todavía existentes dada su complejidad climática. Recientemente el grupo de expertos MedECC (Mediterranean Experts on Environmental and Climate Change) publicó un informe técnico sobre el impacto del cambio climático y ambiental en la región mediterránea, en el que destacaba un aumento de temperatura del aire superior a la media mundial y previsiones estremecedoras respecto a los recursos hídricos incluyendo entre ellas el aumento de los riesgos hidrometeorológicos. A esta tendencia se une la gran variabilidad natural de la precipitación, sobre todo en la cuenca Occidental, en la que es posible registrar en un día una precipitación igual o superior a la anual, y, por el contrario, períodos de sequía que han llegado a forzar migraciones. No se puede olvidar, además que las inundaciones son un riesgo y como tal intervienen factores vinculados con la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición. En un contexto semejante este capítulo presenta una síntesis del estado del conocimiento sobre el cambio climático en el Mediterráneo, los tipos de inundaciones que son más característicos y los factores más importantes que intervienen, su evolución en el pasado y las posibles tendencias futuras, para acabar comentando las posibles medidas de adaptación.

1. INTRODUCCIÓN

Los riesgos hidrometeorológicos (es decir, todos los riesgos naturales relacionados con las condiciones meteorológicas, siguiendo el nomenclador de UNISDR-*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*-) constituyen el riesgo natural más importante del mundo. Particularmente las inundaciones son los riesgos que afectan a mayor número de personas (unos 85 millones en media anual para el período 2005-2014 según UNISDR) y bienes (desde 1900, las inundaciones fluviales en el Área Mediterránea han causado daños por más de 85 mil millones de euros según EM-DAT, http://www.emdat.be/). Su mitigación y adaptación al impacto que el cambio climático tiene en ellas es una prioridad en la mayoría de las agendas gubernamentales. Sin embargo, los informes y documentos recientes aún muestran una incertidumbre significativa asociada con su evolución futura (IPCC, 2012). La incertidumbre es aún mayor cuando consideramos la interacción con la sociedad y los cambios en la vulnerabilidad. Por lo tanto, deben tratarse desde una perspectiva holística que integre enfoques de abajo hacia arriba (desde el impacto y la vulnerabilidad, *bottom-up*) y de arriba hacia abajo (desde la peligrosidad hasta el impacto, *top-down*).

Esta dificultad aumenta cuando nos referimos a la región Mediterránea, localizada en una zona en la que pueden confluir entradas de masas de aire subtropicales y polares. Además, el Mediterráneo es un mar cálido y casi cerrado, rodeado de una orografía caracterizada por un notable relieve montañoso, que favorece la ciclogénesis y la existencia de una masa de aire con una elevada humedad, inestabilidad y energía latente, con el consecuente desarrollo de episodios de tiempo adverso como

son las inundaciones súbitas o los fuertes temporales de viento. Todo ello hace que la predicción del tiempo, y, por ende, la predicción climática, sean más complicadas de lo usual. También lo es el contexto sociocultural e histórico, siendo la distribución de recursos muy desigual. El Norte presenta un mayor bienestar, desarrollo económico y estabilidad gubernamental, mientras que el Sur y Oriente Medio se caracterizan por un rápido crecimiento demográfico, pasando de unos 105 millones de personas en 1960 a más de 440 millones en 2017. El cambio climático agrava todas estas diferencias, más aún si se tiene en cuenta que una gran parte de la población habita en zonas costeras y se espera que en 2050 ésta represente el 70% del total.

Pese a todo ello la región Mediterránea hasta ahora apenas aparecía referenciada y con entidad propia en los informes del IPCC, y será el *Assessment Report* 6 el que le dedicará por primera vez un capítulo transversal. Este capítulo estará basado en los estudios realizados por el grupo de expertos del MedECC y que se presentará a continuación. El capítulo continúa con una breve introducción sobre las características de las inundaciones en el Mediterráneo para luego entrar en el análisis de tendencias pasadas, presentes y futuras. Finaliza con un análisis de las posibles medidas de adaptación y las conclusiones.

2. EL PRIMER INFORME SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MEDITERRÁNEO

2.1. MedECC

Durante la Med-COP21, en julio de 2015, se creó el Grupo de Expertos de Cambio Climático y Ambiental del Mediterráneo (MEDECC, *Mediterranean Expert Group on Cliamte and Environmental Change*). Su objetivo principal era la elaboración del Primer Informe sobre el Cambio Climático y Ambiental del Mediterráneo (*First Mediterranean Assessment Report, MAR1*) que saldrá a la luz a finales de 2020. Sin embargo, algunos de sus resultados ya se han publicado y se han dado a conocer en foros públicos como la COP-24 o la Cuarta reunión de Ministros de Exteriores de la Unión del Mediterráneo celebrada en Barcelona en octubre de 2019. Es en estos resultados (MEDECC, 2019) así como en el artículo de Cramer et al. (2019) que vamos a basar una parte de este capítulo.

2.2. Un rápido recorrido sobre las principales conclusiones

2.2.1. Tendencias y situación actual

La región Mediterránea se ha calentado 1,4ºC respecto al período preindustrial (unos 0,03ºC/año) que viene a ser un 20% más de la media global. Los mayores aumentos de temperatura se registran en verano, acompañados de una mayor frecuencia de las olas de calor y las noches tropicales (la temperatura mínima no baja de 20ºC). Se constata una mayor duración de los días consecutivos sin lluvia en toda la región, y también un aumento de sequías. La temperatura del Mar Mediterráneo ha aumentado unos 0,4ºC/década entre 1985 y 2006, aumentando más en el Este (unos 0,5ºC/década) que en el Oeste (unos 0,3ºC/década). Este calentamiento es mayor en mayo, junio y julio. Los océanos absorben un 30% del dióxido de carbono antropogénico, aumentando su acidez y perjudicando los ecosistemas marinos. Se ha observado una disminución del pH de 0,1 y se calcula que continuará disminuyendo entre 0,018 a 0,028 por década.

A consecuencia del calentamiento el nivel del mar Mediterráneo subió 1,1 mm/año entre 1970 y 2006, lo que está siendo agravado por la pérdida de hielo de la Antártida y Groenlandia. Los ecosistemas terrestres padecen la pérdida de biodiversidad tanto debido al cambio climático como al cambio de usos del suelo, sobrexplotación y contaminación. El abandono de las prácticas agrícolas y de las zonas de pasto de ganado, sobre todo en el Norte, es una de las causas principales, agravándose por el crecimiento de zonas forestales proclives a padecer incendios. Cabe decir, sin embargo, que la tendencia observada en la región Mediterránea, y con excepción de algunas zonas cómo Sicilia o

Portugal, es de una disminución del área quemada debido a la mejora de la prevención y extinción. Aun así, los escenarios apuntan a un aumento próximo al 40% con un aumento de 1,5ºC y de más del 100% si se llegan a los 3ºC (Turco et al., 2018)

2.2.2. Proyecciones y escenarios futuros

Sin medidas de mitigación la temperatura aumentará unos 2,2ºC en 2040 y superará los 3,8ºC en algunas subregiones en 2100, agravado por el efecto de Isla Urbana de las ciudades que pueden incrementar esas temperaturas unos 4ºC. Para muchas de las grandes ciudades de la región MENA (Norte de África y Este del Mediterráneo) el verano más fresco será más cálido que el mes estival más frío del presente. Por cada grado que aumente la temperatura la precipitación disminuirá del orden de un 4%, sobre todo en el Sur. Para más de 2ºC, en algunas regiones puede llegar a disminuir un 30% (ej. Turquía) e incluso desaparecer la estación de heladas (ej. Balcanes).

Los modelos muestran un aumento de las lluvias intensas en el Norte, que es precisamente la región más castigada por inundaciones, mientras que en el Sur se prevé que disminuirán. Por el contrario, las sequías extremas serán más frecuentes que en la actualidad. El aumento en la duración de estas rachas secas se prevé que sea de un 7% para un aumento de 1,5ºC. Para 2ºC se calcula que el agua dulce disponible para su consumo puede disminuir entre un 2% y un 15%, lo que unido a un aumento de la demanda debido al crecimiento de la población (entre el 22% y el 74%) y a la disminución de recursos subterráneos, tanto en calidad como en cantidad, puede dar lugar a que en los próximos 20 años unos 250 millones de personas sean pobres en agua (menos de 1000 m3/año), siendo la escasez mayor en el Este y el Sur. Además, se calcula un aumento entre un 4% y un 18% de las necesidades de agua para el regadío (éste constituye entre un 50% y un 90% de la demanda total).

En función de los escenarios de emisión se calcula que la temperatura del Mar Mediterráneo puede aumentar entre 1,8ºC y 3,5ºC en 2100. La acidificación y el aumento de temperatura del mar puede llevar a la pérdida de un 41% de los depredadores marinos (incluidos mamíferos), el aumento en la intensidad y extensión de colonias de medusas, y la invasión de más de 700 especies no autóctonas (plantas y animales), incluidos depredadores como el pez león, la mayor parte procedentes del Mar Rojo, que pueden provocar mayores pérdidas en el hábitat autóctono. A ello hay que añadir que la sobrexplotación pesquera ha conducido a la pérdida de un 34% de las especies de peces. En 2100 el nivel del mar podría haber aumentado entre 52 y 190 cm. Los impactos de estos cambios son muy graves ya que un tercio de la población vive en regiones costeras, siendo más de 37 millones de personas en el caso del Norte de África. En 2050 se considera que la mitad de las 20 ciudades del mundo que más sufrirán el aumento del nivel del mar se encuentran en el Mediterráneo. Estos impactos incluyen, entre otros, la erosión costera y afectación de infraestructuras situadas en la costa, el aumento de la intrusión salina y de las inundaciones costeras y la pérdida de playas, zonas de cultivo y marismas.

3. HACIA UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA A LAS INUNDACIONES EN EL MEDITERRÁNEO

3.1. Inundaciones y precipitación

Las inundaciones en la región Mediterránea suelen ser súbitas, conociéndose en inglés como *flash-floods* (Gaume et al., 2016). Las cadenas montañosas litorales y prelitorales favorecen no solo la lluvia torrencial concentrada en pequeñas cuencas, sino también las fuertes lluvias. Aunque no existe una definición única, este tipo de inundaciones se caracteriza por ser una inundación repentina en una pequeña área de captación (generalmente menos de 1000 km^2), que ocurre dentro de las 6 horas o menos del evento causante (lluvia intensa, ruptura de la presa, rotura de un dique, deshielo rápido o inundación de desbordamiento de glaciares) y, a menudo, dentro de las 2 horas posteriores al comienzo de la lluvia de alta intensidad (ver www.nws.noaa.gov). Las inundaciones repentinas

generalmente son causadas por fuertes lluvias que pueden ser locales, afectando solo una o dos cuencas, o más extendidas, produciendo inundaciones repentinas como parte del marco de un evento de inundación importante.

Desde una perspectiva climática, las lluvias de origen convectivo generalmente se producen en verano y principios de otoño, porque se ven favorecidas por la inestabilidad de bajo nivel y las altas temperaturas (Llasat et al., 2013; Papagiannaki et al., 2013). En la región mediterránea, los eventos de verano suelen ser locales y de corta duración, mientras que, en otoño, la temperatura más cálida de la superficie del mar, así como la gran cantidad de ciclones y perturbaciones organizadas, pueden dar lugar a eventos catastróficos.

3.2. Otros factores a considerar

Ya hemos dicho que como todo riesgo natural en las inundaciones es necesario distinguir entre los aspectos de peligrosidad y vulnerabilidad. Según UNISDR la peligrosidad se referiría a la frecuencia, intensidad y magnitud de éstas, y la vulnerabilidad incluiría todos los factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de un individuo, una comunidad, activos o sistemas a los impactos de las inundaciones. Se podría pensar que la vulnerabilidad está constituida por la exposición, sensibilidad y resiliencia, aunque hay que recalcar que ni existe consenso ni entre las diferentes disciplinas e incluso, dentro de la misma disciplina, sobre la acepción del término vulnerabilidad (Nakamura y Llasat, 2017). Consecuentemente cuando se analice la evolución y tendencias de las inundaciones será necesario tener presentes todos estos factores.

4. TENDENCIAS Y PROYECCIONES FUTURAS

Debido a los cambios en las sociedades, el uso de la tierra y las políticas de actuación, los impactos de las inundaciones en los individuos y sociedades han cambiado con el tiempo, aumentando o disminuyendo según la región. A ello se une la propia variabilidad climática, que afecta a la precipitación y evapotranspiración, y el más reciente cambio climático global de origen antropogénico. En consecuencia, cuando se habla de las tendencias de las inundaciones y se pretende asociar la causa a este último se ha de tomar una posición muy precavida (Merz et al., 2012; IPCC, 2012). El IPCC concluye que hay evidencia "limitada a media" disponible para evaluar los cambios provocados por el clima en la magnitud y frecuencia de las inundaciones a escala regional, con evidencia de "bajo acuerdo" y "baja confianza" a escala global para detectar estos síntomas. Las principales fuentes de incertidumbre o, incluso, en algunos casos de confusión, son las siguientes:

- El propio concepto de inundación. Desde una perspectiva “top-down” suele entenderse como tal un valor extremo de caudal, sin prestar importancia al hecho de que haya o no impactos. A su vez el concepto extremo puede cuantificarse de numerosas formas (períodos de retorno, superación de umbrales, etc.) (ej. Blösch et al., 2019). Si la perspectiva es “bottom-up”, se suele partir de la información acerca de los daños producidos, sin tener en cuenta la mayor o menor frecuencia del evento. En este caso los criterios de selección pueden ser muy diferentes afectando completamente a la muestra que se va a analizar (Llasat et al., 2013a)
- La longitud, homogeneidad y período comprendido por la serie analizada (Llasat et al., 2013b)
- La confusión semántica que a veces hay entre lluvias intensas e inundaciones.
- La fiabilidad de las medidas y observaciones, así como de la calidad y continuidad de la información (Llasat et al., 2013b).
- La metodología de cuantificación de eventos que puede referirse a la cuenca o región en su conjunto, a todos los puntos para los que consta impacto, o al episodio hidrometeorológico total (véase, por ejemplo, la diferencia entre los criterios de Barriendos et al., 2003 en que se trabaja a escala histórica por localidades, y Llasat et al., 2013b en que se trabaja por episodios)

- Los cambios experimentados en la cuenca ya sea en los usos de suelo, ya sea en infraestructuras hidraúlicas (Merz et al., 2012; Hall et al., 2014)
- Los cambios en exposición, capacidad de respuesta, alerta temprana, etc. (Kreibich et al., 2017)

En la síntesis que se presenta a continuación no tiene por qué haber acuerdo entre autores e incluso para un mismo autor en diferentes contextos, por lo que siempre que se ha conseguido averiguar se aclara entre paréntesis lo que se entiende por inundación, el período al que se refiere, etc.

4.1. Tendencias

4.1.1. Tendencias seculares

Un estudio publicado recientemente en Nature (Blösch et al., 2020) muestra la compilación y análisis de todas las series históricas de inundaciones en Europa desde 1500 hasta 2016 construidas a partir de datos de archivos, prensa, etc. Para homogeneizarlas se han puesto todos los textos en los respectivos contextos históricos con una atención minuciosa a los detalles, a fin de hacerlas comparables. Ello ha permitido crear una regionalización e identificar nueve períodos ricos en inundaciones. Entre los períodos más notables destacan 1560–1580 (Europa occidental y central), 1760–1800 (la mayor parte de Europa), 1840–1870 (Europa occidental y meridional) y 1990–2016 (Europa occidental y central). Las comparaciones con las reconstrucciones de temperatura del aire muestran que estos períodos históricos de inundación fueron sustancialmente más fríos que las fases intermedias, lo que parece contradecir la observación de que, en algunas áreas, como en el noroeste de Europa, el clima más cálido reciente está alineado con mayores inundaciones. En el artículo se plantea por tanto que los mecanismos subyacentes pueden haber cambiado y que las condiciones hidrológicas del presente son muy diferentes de las del pasado. A ello se une un cambio en la distribución estacional: anteriormente, el 41% de las inundaciones de Europa Central ocurrían en el verano, en comparación con el 55% actual. Estos cambios estarían relacionados con los cambios en la precipitación, la evaporación y el deshielo, constituyendo un indicador importante para distinguir el papel del cambio climático del de otros factores de control como la deforestación y la gestión fluvial.

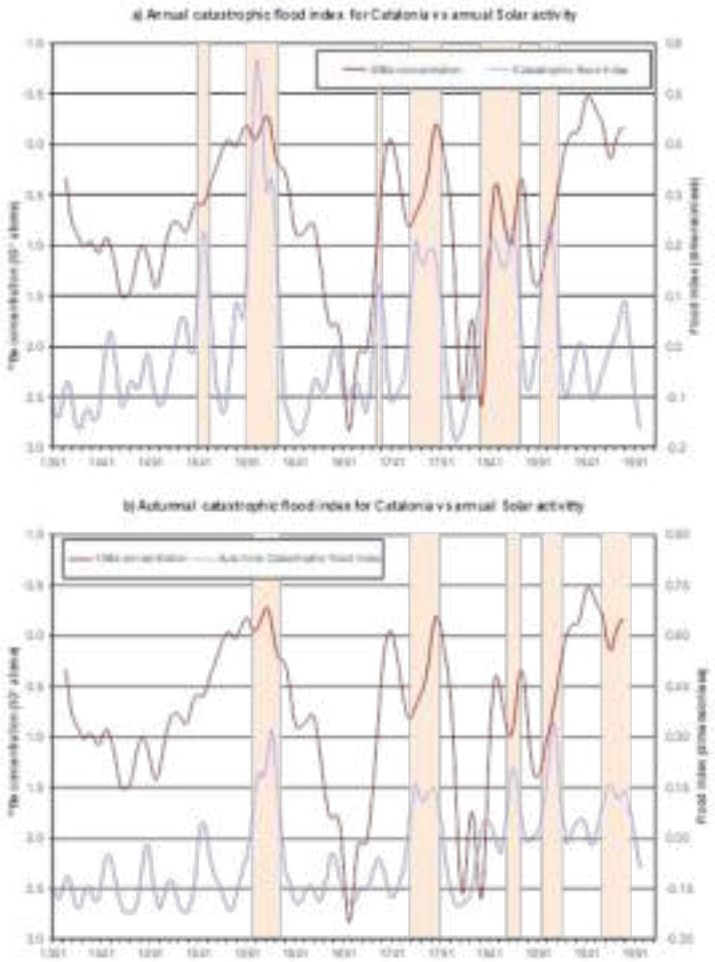


Figura 1. Evolución temporal de la actividad solar a partir de ^{10}Be (Berggren et al., 2009) respecto al índice de inundaciones catastróficas anuales (a) y otoñales (b) para Cataluña (1389-2012), suavizados mediante un filtro gaussiano de 31 años. La escala de^{10} Be está invertida porque su concentración es alta para períodos de actividad solar mínima y baja para períodos de actividad solar máxima. Se destacan los períodos anómalos de alta frecuencia de inundación. Fuente: Barrera-Escoda y Llasat (2015).

Ya en el proyecto SPHERE (Benito et al., 2004) se había analizado la variación secular de las inundaciones en la región Noroeste del Mediterráneo. Por un lado, se obtenía una tendencia positiva de los episodios considerados como extraordinarios (inundaciones que producían daños importantes, pero no destrucción total de puentes, edificios o molinos), a partir de finales del siglo XIX, que se vinculaba en su mayor parte a los cambios en los usos del suelo. Por otro lado, se identificaban unos períodos anómalos de inundaciones catastróficas (con destrucción total) concentrados sobre todo en torno a la Pequeña Edad de Hielo (Barriendos et al., 2003; Llasat et al., 2005), lo que estaría acorde con las observaciones de Blösch et al. (2020). El análisis detallado de la llamada Oscilación Maldá, caracterizada por un máximo de inundaciones entre 1760 y 1800 (Fig.1), mostraba una anomalía en el índice NAO (Barriendos y Llasat, 2003) vinculado con la circulación atmosférica en el Atlántico Norte. Barrera-Escoda y Llasat (2015) ampliaban la serie a 1301-2012 y analizaban no sólo la relación con la NAO sino también con la actividad solar encontrándose una correlación negativa y significativa notable (-0,42 para la estación de otoño, Fig. 1). Desde un punto de vista físico, las justificaciones más recientes apuntan a una influencia en el calentamiento y enfriamiento de regiones de la estratosfera con el consecuente impacto en la circulación troposférica dándole peso a las posibles teleconexiones, tales como la NAO (Ermolli et al., 2013). A su vez la circulación a escala sinóptica

va a dar unos tipos de tiempo más o menos favorables al desarrollo de lluvias intensas, que en el Mediterráneo constituyen la principal causa de las inundaciones, tales como la presencia de bajas sinópticas o mesoescalares (Gilabert y Llasat, 2017; Jansà et al., 2014). Estos resultados son coherentes con estudios que se están llevando a cabo en la actualidad para encontrar las fuentes de vapor de agua que alimentan las lluvias intensas en el Mediterráneo y que demuestran el notable papel de las fuentes de origen Atlántico en contra de la percepción existente de que la mayoría procedía del Mediterráneo (Insua-Costa et al., 2019). Los últimos episodios de inundación que han afectado la costa Mediterránea española serían una llamada a la reflexión en este contexto, dada la influencia que el deshielo de Groenlandia tiene en la variabilidad climática a gran escala sobre la cuenca del Mediterráneo, parcialmente asociada a patrones de circulación como la Oscilación del Ártico (AO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) que controlan parte de los flujos de humedad sobre las cuencas del Mediterráneo occidental y oriental (Tramblay y Hertig, 2018).

4.1.2. Tendencias recientes

Cuando ampliamos la resolución temporal y acercamos la escala a nuestros días, la influencia de otros factores no climáticos toma un mayor relieve. Si bien la mayor parte de los estudios concuerdan en que los daños por inundaciones están aumentando (Barredo et al., 2012; CRED-UNISDR, 2015), las observaciones apuntan a lo contrario en algunas regiones. En España y el sur de Francia, se han encontrado tendencias generalmente decrecientes en los caudales máximos anuales (Mediero et al., 2014; Renard et al., 2008). La atribución de estas tendencias negativas no está clara si consideramos el aumento de las áreas boscosas en la parte superior de las cuencas hidrográficas como consecuencia de una disminución de las áreas cultivadas (Hall et al., 2014). Para el río Po (Italia) no se observa una tendencia clara en las avenidas máximas anuales (Montanari, 2012). Por el contrario, en Grecia se ha observado un aumento en la frecuencia de inundaciones en las últimas décadas (Diakakis, 2014). Para las cuencas mediterráneas, Mangini et al. (2018) obtiene una tendencia a un aumento de la magnitud de las inundaciones, pero disminución de la frecuencia.

El análisis de Blöschl et al. (2019) de la base de datos más completa de inundaciones en Europa para el período 1960-2010 (entendidas como extremos de caudal) muestra para la región Mediterránea una tendencia decreciente en cuencas medianas y grandes debido principalmente a la disminución de la precipitación y al aumento de la evaporación. En particular, en España, el cambio en la descarga media anual de las inundaciones por década estaría entre -5 y -12%. Esta divergencia entre las tendencias observadas en la descarga máxima de inundación y los daños puede estar asociada con otros parámetros como la exposición y la vulnerabilidad. De hecho, Barredo et al. (2012) muestran que el aumento del impacto económico de las inundaciones puede deberse, en parte, a un aumento de la propiedad asegurada y el costo de la vida. En el caso de los países mediterráneos hay otro factor importante relacionado con el hecho de que la mayor parte de inundaciones se producen en cuencas torrenciales no aforadas, afectando principalmente a la costa, donde la población y los asentamientos urbanos están aumentando rápidamente en áreas propensas a las inundaciones (Gaume et al., 2016). Así, un análisis detallado y sistemático muestra un aumento de las inundaciones en regiones de Italia, Francia y España para el período 1981-2010 (Llasat et al., 2013b).

En el análisis comparativo de pares de eventos sucedidos en la misma región en dos momentos diferentes (por ejemplo, los episodios del 10 de junio del 2000 i del 25 de septiembre de 1962 en Cataluña) y para diferentes lugares del mundo, Kreibich et al. (2017) concluyen que en general el impacto de las inundaciones ha disminuido en los países más desarrollados económicamente, debido sobre todo a las modificaciones en los hábitos y comportamientos, tanto por la mejora generalizada del nivel cultural de la población como por la mejora de las medidas preventivas, el sistema de alertas tempranas y la gestión de la emergencia, lo que no es óbice para un aumento del valor de los activos expuestos.

Respecto a la precipitación no se observa ninguna tendencia significativa en los extremos superiores a

escala diaria. Sin embargo, Llasat et al. (2016) han encontrado en el NE de España una pequeña señal en el aumento de la precipitación convectiva concentrada en menos eventos, que estaría acorde con ese aumento de inundaciones súbitas muy locales.

4.2. Proyecciones

Aunque en término medio se espera que la precipitación en el Mediterráneo disminuya, algunos estudios encuentran que las precipitaciones diarias extremas podrían aumentar debido al cambio climático (Colmet-Daage et al., 2018). Tramblay y Somot (2018) demuestran un potencial aumento en la precipitación diaria extrema en las cuencas del norte del Mediterráneo y una disminución en el sur de éste para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del experimento Euro-CORDEX.

Cortès et al. (2019) muestran los cambios en la probabilidad de daños por inundaciones en la parte oriental de España (concretamente en las comunidades de Cataluña y País Valenciano) a consecuencia de un calentamiento global de 1,5º, 2º y 3º C por encima de los niveles preindustriales y teniendo presentes diferentes escenarios de población. El modelo utiliza un conjunto de siete simulaciones de modelos climáticos regionales del proyecto EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014), y considera 5 escenarios socioeconómicos diferentes que incluyen proyecciones de población, urbanización y Producto Interno Bruto a escala mundial y nacional (O'Neill et al., 2014). Los resultados apuntan a un aumento de la probabilidad de que se produzca un evento con importantes daños económicos, con mayores incrementos cuando se considera un mayor calentamiento y cuando se incluyen tanto el cambio climático como el cambio de población. El estudio no trata con proyecciones de inundaciones sino de precipitación a escala diaria, dada la notable correlación que se observa entre lluvia e impacto por inundaciones, tomándose el umbral de 40 mm como aquel a partir del cual existe la posibilidad de que se produzcan inundaciones súbitas en cuencas pequeñas (Cortès et al., 2017) cuando semejante cantidad se recoge en un período de tiempo muy corto.

5. LOS LÍMITES DE LA ADAPTACIÓN A LAS INUNDACIONES EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO Y AMBIENTAL

5.1. El Marco de Sendai

No se puede hablar de adaptación a las inundaciones sin tener presente la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres y los acuerdos en el Marco de Sendai (18 de marzo de 2015). Este marco presenta siete objetivos globales que se pueden sintetizar como sigue:

1. Reducir la tasa promedio de mortalidad global por 100,000 en la década 2020-2030 en comparación con el período 2005-2015.
2. Reducir la cifra global promedio de personas afectadas por 100,000 en la década 2020-2030 en comparación con el período 2005-2015.
3. Reducir la pérdida económica directa por desastres en relación con el producto interno bruto (PIB) mundial para 2030.
4. Reducir sustancialmente los daños causados por desastres en las infraestructuras críticas y la interrupción de los servicios básicos para 2030.
5. Incrementar sustancialmente el número de países con estrategias nacionales y locales de reducción del riesgo de desastres para 2020.
6. Mejorar sustancialmente la cooperación internacional a los países en desarrollo a través de un apoyo adecuado y sostenible para complementar sus acciones nacionales para la implementación de este Marco para 2030.
7. Aumentar sustancialmente la disponibilidad y el acceso a los sistemas de alerta temprana multi-riesgos, información y evaluación de riesgos de desastres para 2030.

Estos objetivos deben lograrse siguiendo las Cuatro Prioridades para la Acción:
• Prioridad 1. Comprender el riesgo de desastres
• Prioridad 2. Fortalecimiento de la gobernanza del riesgo de desastres
• Prioridad 3. Invertir en la reducción del riesgo de desastres para mejorar la resiliencia
• Prioridad 4. Mejorar la preparación frente a los desastres en cuanto a recuperación, rehabilitación y reconstrucción

Hay tres dimensiones de la gestión de desastres que pueden ayudar a hacer frente a estos objetivos y prioridades: filosófica, estrategia y táctica. Por ejemplo, la Directiva de inundaciones de la UE de 2007 ofrece una filosofía de gestión del riesgo de inundaciones. La estrategia indica objetos o temas para completar cada función, y las tácticas son métodos concretos para ejecutar cada estrategia. Por ejemplo, la mejora de las percepciones individuales del riesgo es una estrategia de mitigación, que incluye varias tácticas como la distribución de mapas de riesgo de inundación, campañas en los medios, letreros, exhibiciones y educación escolar (Nakamura y Llasat, 2017).

Estas dimensiones pueden contemplarse en las diferentes estrategias desarrolladas para adaptarse a las inundaciones y que se van a comentar en el apartado siguiente.

5.2. Medidas de adaptación en el Mediterráneo

Sin menospreciar otras aproximaciones podemos abordar las medidas de adaptación partiendo de dos constataciones: los impactos en vidas humanas y los impactos económicos. Petrucci et al. (2019) han publicado la base de datos EUFF (EUropean Flood Fatalities) que contiene todas las personas fallecidas a consecuencia de las inundaciones en algunas regiones de Europa, la mayoría Mediterráneas (República Checa, Israel, Italia, Turquía, Grecia, Portugal, sur de Francia, Cataluña y Baleares) para el período 1980-2018. Este trabajo identifica 812 inundaciones fatales con 2466 muertes, por lo que, en promedio, cada evento mató a 3 personas. Se trata principalmente de personas con edades comprendidas entre 30 y 49 años arrastradas por el agua o el lodo cuando viajaban en vehículos de motor o intentaban vadear ríos. Esto apunta a la necesidad de mejorar la autoprotección a partir de la mejora de los planes de sensibilización y comunicación a la población. La probabilidad de morir durante una inundación depende esencialmente de algunos parámetros físicos que caracterizan la interacción humano-inundación, y que en general se desconoce, como la velocidad del agua, la altura del nivel del agua y la turbidez del agua.

Respecto al tema económico y a pesar de que se han publicado numerosos artículos centrados en la vulnerabilidad en el campo de los peligros naturales, la investigación dedicada a caracterizar la vulnerabilidad económica debido a las inundaciones desde un punto de vista holístico ha sido escasa. Una de las evaluaciones más típicas es a través de los costos económicos resultantes de los datos de reaseguro. Dado que disminuir la cobertura frente a las inundaciones no es aconsejable, se trataría de ver cómo sería posible mitigar los daños. Una buena aproximación sería la ofrecida por Aroca-Jiménez et al. (2018) quienes proponen un Índice de Vulnerabilidad Económica Integrada (IEVI) para zonas urbanas que tiene en cuenta esencialmente tres componentes: 1) Exposición (daños potenciales causados en áreas propensas a inundaciones y daños potenciales a nivel individual); 2) Sensibilidad (nivel de riqueza y capacidad económica de las zonas urbanas para hacer frente a las consecuencias de las inundaciones); 3) Resiliencia (capacidad de los ciudadanos para hacer frente a las consecuencias de una inundación repentina). Las medidas de adaptación en respuesta a estos tres factores se centrarían en la no ocupación de zonas inundables e incluso la relocalización, la inversión para la mejora de planes e infraestructuras de inundaciones y, de nuevo, la capacitación de la ciudadanía para mejorar su autoprotección y toma de decisiones previamente y durante las inundaciones, así como medidas de ayuda para la recuperación.

5.2.1 Protección estructural contra inundaciones

No es extraño en la Europa Mediterránea encontrar todavía estructuras de defensa frente a las inundaciones construidas durante la denominación romana y la Alta Edad Media (Llasat y Siccardi, 2010). De hecho, en Barcelona, las propias murallas de defensa de la ciudad habían actuado como protección frente a las inundaciones (Barrera et al., 2006) y actualmente la misma ciudad está reconocida por la UNISDR como ciudad resiliente por sus depósitos de aguas pluviales y sistemas de prevención (Nakamura y Llasat, 2017). En esencia este tipo de medidas consiste en instalaciones de desviación y retención, represas de control, depósitos de control de inundaciones, embalses, diques, etc. Su ventaja es que en muchas ocasiones es la única solución para disminuir el número de eventos, como sería el caso de Gerona (Benito et al., 2004) o disminuir el riesgo en zonas ya construidas, como sucedería en Valencia. Sin embargo, las principales limitaciones son las siguientes:

- Costo de construcción y mantenimiento.
- Impacto en los ecosistemas, el paisaje.
- Impactos colaterales: desplazamiento de la población, efectos en cascada, fallas de infraestructuras críticas.
- "Efecto de dique" conocido también como "paradoja del desarrollo seguro" o "dilema de seguridad". Se trata de un efecto no intencionado que, paradójicamente, puede aumentar el riesgo, ya que atrae nuevos asentamientos y bienes en áreas aparentemente "protegidas", aumentando la exposición y creando una sensación de falsa seguridad (Di Baldassarre et al, 2018).

5.2.2. Planificación del uso del suelo y otras regulaciones legales

Se incluyen aquí los códigos de construcción, seguros obligatorios, mapeo de riesgos ...
Las principales limitaciones son:

- Difícil accesibilidad a los mapas de peligro / riesgo a pesar de ser "públicos"
- Difícil comprensión de los mapas de peligro / riesgo
- Planificación urbana e intereses personales / públicos.
- Cambios en el precio del suelo.
- Sistemas de reaseguros que no favorecen las buenas prácticas.

5.2.3. Sistemas de alerta temprana

Dependen del tipo de inundación. El éxito de los sistemas de advertencia depende de los tiempos de escorrentía, la cadena de comunicación, la capacidad (tiempo, espacio, movilidad) de las personas para moverse (o permanecer) a un lugar seguro. Las principales limitaciones son:

- Límites de modelado físico y computacional.
- Diferentes criterios entre diferentes organismos en el mismo lugar / región.
- Aumentar la incertidumbre inicial combinándola con la incertidumbre de los siguientes procesos.
- Cadena de comunicación

5.2.4. Planes de emergencia

Planes de emergencia, coordinación de protección civil y otros operativos, procedimientos de evacuación y mapas. Las principales limitaciones son:

- Falta (o no aplicación) de planificación local
- Inexistencia de mapas de evacuación.

5.2.5. Percepción del riesgo

Campañas, información, medios de comunicación, empoderamiento de la población, autoprotección. Esas acciones deberían mejorar la percepción de riesgo de los habitantes y los extranjeros. Sin embargo, las principales limitaciones son:

- "Mala memoria" de eventos pasados
- Falsa sensación de seguridad.
- No hay suficiente información pública.
- Diferentes experiencias de diferentes individuos o grupos dentro de una sociedad.

Dado que este es uno de los puntos en que más insiste el marco de Sendai, una mejor resiliencia a los riesgos hidrometeorológicos a través de un mejor conocimiento y sensibilización debería mejorar la percepción del riesgo y el empoderamiento individual y social. La percepción y la conciencia social determinan la efectividad de la mitigación del riesgo de inundación y los planes de emergencia, ya que permiten diseñar planes adecuados de comunicación y educación sobre el riesgo para mejorar la resiliencia de la comunidad (exposiciones, demostraciones, talleres, ...). Los datos históricos y el conocimiento de eventos pasados son una de las mejores herramientas para mejorar la conciencia del riesgo. Son útiles para el mapeo de riesgos, identificando grupos vulnerables y clasificando las circunstancias en términos de peligrosidad, haciendo campañas educativas con el objetivo de promover la conciencia del riesgo y los comportamientos defensivos. Se puede aumentar la resiliencia de las personas a las inundaciones a través de: campañas educativas, enseñar a las personas cómo comportarse en caso de inundación y evitar situaciones de riesgo, como conducir a través de las aguas de la inundación o nadar en un río inundado. Este objetivo involucra varios temas: la comunidad científica, los tomadores de decisiones, la organización de manejo de emergencias y, finalmente, los individuos.

La gestión integral del riesgo de inundación implica un análisis integrado de vulnerabilidad más planes de comunicación de riesgos para informar a la población sobre cómo deben proceder (o cómo no deberían) cuando se enfrentan a un evento de inundación. La participación de la población en la formulación de estrategias de reducción de vulnerabilidad reduce los posibles daños económicos, aumenta la eficiencia de los planes de gestión de riesgos, aumenta el empoderamiento y aumenta la resiliencia de la comunidad. Hoy en día, los teléfonos móviles y las redes sociales son útiles para salvar vidas y alertar a las personas sobre situaciones peligrosas relacionadas con inundaciones. Las aplicaciones pueden ser útiles para desarrollar la ciencia ciudadana (los ciudadanos pueden participar activamente en alguna fase del proceso de investigación), como el caso de FLOODUP (Llasat-Botija et al., 2018), una aplicación de teléfono móvil que proporciona información sobre inundaciones, qué hacer / no hacer y recopilar datos para reconstruir eventos de inundación.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de este capítulo hemos analizado las inundaciones en el Mediterráneo en un contexto de cambio climático y ambiental y teniendo en cuenta una perspectiva holística que también incluya otros aspectos como las medidas de adaptación. En síntesis, las conclusiones más notables serían las siguientes:

1. No existen suficientes pruebas de que las inundaciones fluviales esten aumentando en el Mediterráneo.
2. Las inundaciones repentinas en pequeñas cuencas no aforadas (flash-floods) están aumentando debido al aumento de la peligrosidad (lluvias más intensas y concentradas en períodos muy cortos de tiempo unido a la degradación de las cuencas) y de la vulnerabilidad (mayor ocupación de zonas inundables).
3. A estos cambios hay que añadir la variabilidad natural ya detectada en series seculares.
4. Se detecta un cambio de patrón hidrometeorológico en las inundaciones en Europa que puede estar tanto asociado a condiciones termodinámicas que favorecen la convección, como dinámicas a escala global.
5. Las proyecciones futuras apuntan a un aumento de las lluvias intensas, sobre todo en la Europa

Mediterránea.

6. Teniendo en cuenta los escenarios futuros tanto pluviométricos como socioeconómicos, la probabilidad de que se produzcan eventos de inundaciones de alto impacto aumentará, tanto más cuanto mayor sea la temperatura.
7. Las inundaciones catastróficas altamente mortales están disminuyendo. Por el contrario, se produce un mayor número de casos con una o dos víctimas debido, en general, a comportamientos imprudentes favorecidos por el desconocimiento del peligro y la creciente confianza en la tecnología. La movilidad de la población y el desconocimiento del territorio, creciente en una población cada vez más urbana, aumenta este riesgo.
8. Debido a la alta variabilidad espacial y al alto grado de complejidad en las relaciones entre los diferentes factores de vulnerabilidad, se propone el uso de índices integrados para estimar los impactos económicos. En el caso de los enfoques regionales y la falta de información suficiente, los datos de seguros se pueden utilizar como proxy.
9. Es necesario incluir variables que consideren el cambio en las condiciones climáticas y socioeconómicas en el análisis de daños por inundación.
10. La gestión de inundaciones debe tratarse desde un punto de vista integrado y holístico.

Respecto a las medidas de adaptación, las lecciones para aprender y los mensajes para llevar a casa son los siguientes:

- Dado que no es posible garantizar la seguridad total, la gestión de riesgos actualmente está dirigida a reconocer el riesgo y hacer que las personas estén conscientes y preparadas para vivir con el riesgo.
- La cartografía de riesgo de inundaciones se ha convertido en una herramienta esencial para la planificación de usos del suelo frente a las inundaciones. Deben estar vinculados a otras contramedidas (regulación del uso del suelo, seguros, advertencias).
- Las estrategias y tácticas de riesgo deben basarse no solo en el modelado sino también en el análisis de datos históricos y eventos pasados. Son útiles para el mapeo de riesgos, identificando grupos vulnerables y clasificando las circunstancias en términos de peligrosidad, haciendo campañas educativas con el objetivo de promover la conciencia del riesgo y los comportamientos defensivos, en lugar de comportamientos riesgosos.
- La reducción del riesgo debería ser un aspecto clave del desarrollo local, que podría contribuir a la revitalización de la economía local. El gobierno local tiene un papel importante en la gestión y prevención de desastres. Se necesita una mayor cooperación entre los municipios y las organizaciones estatales.
- Si se espera una gestión de riesgos integrada, en todos los casos es necesario comunicar de manera efectiva estas mejoras a los diferentes interesados (tomadores de decisiones, gerentes de emergencias, personal de respuesta a desastres y sociedad)
- Los índices de vulnerabilidad integrados que hacen frente a la complejidad e interacciones de los diferentes factores permiten la definición de tácticas específicas para las estrategias de mitigación de riesgos de acuerdo con los puntos y limitaciones más débiles.
- Las evaluaciones integradas de vulnerabilidad pueden ayudar a las agencias de protección civil a priorizar sus acciones; compañías de seguros para identificar las áreas más vulnerables y delimitar las zonas de catástrofe; formuladores de políticas para diseñar las estrategias más adecuadas; sociedad para asignar apropiadamente los recursos económicos a la reducción de la vulnerabilidad; y para mejorar las acciones de protección de las personas reduciendo los comportamientos de riesgo y la sensibilidad y aumentando la resiliencia.
- El gobierno local tiene un papel importante en la gestión y prevención de desastres. Se

destaca una importante cooperación entre los municipios y las organizaciones estatales.

- Además de las guías de autoprotección proporcionadas por la protección civil, los municipios o comunidades autónomas deben distribuir más información sobre el riesgo fácil de entender, incluidos los mapas y protocolos de evacuación (en diferentes idiomas).
- Las campañas educativas destinadas a promover la conciencia del riesgo natural y los comportamientos defensivos, deben dirigirse a diferentes grupos vulnerables y clasificar las circunstancias en términos de peligrosidad. Las nuevas tecnologías como los teléfonos móviles y las redes sociales son útiles para mejorar la protección y prevención de riesgos. Las exposiciones que contienen información histórica, campañas y metodologías de ciencia ciudadana son útiles para el empoderamiento de la población frente a los riesgos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el contexto del Proyecto español M-CostAdapt (CTM2017-83655-C2-R) financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades-AEI y el proyecto EFA210/16 PIRAGUA, de la convocatoria INTERREG POCTEFA 2014-2020.

REFERENCIAS

- Aroca-Jiménez, A., Bodoque, J. M., García, J. A. and Díez-Herrero, A. (2018). A quantitative methodology for the assessment of the regional economic vulnerability to flash floods. *Journal of Hydrology*, 565, 386-399. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.029
- Barredo, J. I., Saurí, D. and Llasat, M. C. (2012). Assessing trends in insured losses from floods in Spain 1971–2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 12, 1723-1729. https://doi.org/10.5194/nhess-12-1723-2012
- Barrera, A., Llasat, M. C. and Barriendos, M. (2006). Estimation of the extreme flash flood evolution in Barcelona county from 1351 to 2005. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 505-518.
- Barrera-Escoda, A. and Llasat, M. C. (2015). Evolving flood patterns in a Mediterranean region (1301–2012) and climatic factors – the case of Catalonia. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 19, 465-483. https://doi.org/10.5194/hess-19-465-2015
- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M. C., Naulet, R., Lemaitre, F. and Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in france and spain (14th-20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 583-592.
- Barriendos, M., y Llasat, M. C. (2003). The case of the 'Maldá' Anomaly in the Western Mediterranean basin (AD 1760-1800): An example of a strong climatic variability. *Clim. Change*, 61, 191-216.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V. Enzel,Y., Bardossy, A., Coeur, D. and Bobée B. (2004). Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural Hazards,* 31, 623-643.
- Berggren, A. M., Beer, J., Possnert, G., Aldahan, A., Kubik, P., Christl, M., Johnsen, S. J., Abreu, J.., and Vinther, B. M. (2009). A 600-year annual 10Be record from the NGRIP ice core, Greenland, Geophys. *Res. Lett*., 36, L11801.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A. et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature,* 573, 108-111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6

- Blöschl, G., Kiss, A. Viglione, A., Barriendos, M. M., Böhm, O., Brázdil, R., Cœur, D., Demarée, G., Llasat, M. C., Macdonald, N., Retsö, D., Roald, L., Schmocker-Fackel, P., Amorim, I., Bělinová, M., Benito, G., Bertolin, Ch., Camuffo, D., Cornel, D., Doktor, R., Elleder, L., Enzi, S., Garcia, J. C., Glaser, R., Hall, J., Haslinger, K., Hofstätter, M., Komma, J., Limanówka, D., Lun, D., Panin, A., Parajka, J., Petrić, H., Rodrigo, F. S., Rohr, C., Schönbein, J., Schulte, L., Silva, L. P., Toonen, W.H.J., Valent, P., Waser, J., and Wetter, O. (2020). Current flood-rich period is exceptional compared to the past 500 years in Europe. *Nature.*
- Colmet-Daage, A., Sanchez-Gomez, E., Ricci, S., Llovel, C., Borrell, V., Estupina, P., Quintana-Seguí, P., Llasat, M. C. and Servat, E. (2018). Evaluation of uncertainties in mean and extreme precipitation under climate changes for northwestern Mediterranean watersheds from high-resolution Med and Euro-CORDEX ensembles. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 673-687. https://doi.org/10.5194/hess-22-673-2018
- Cortès, M., Turco, M., Llasat-Botija, M. and Llasat, M. C. (2018). The relationship between precipitation and insurance data for floods in a Mediterranean region (Northeast Spain). NHESS. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 18, 857-868. https://doi.org/10.5194/nhess-18-857-2018
- Cortès, M., Turco, M., Ward, Ph., Sánchez-Espigares, J., Alfieri, L. and Llasat, M. C. (2019). Changes in flood damage with global warming in the east coast of Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2855-2877. https://doi.org/10.5194/nhess-2019-253
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J-P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N. and Xoplaki, E. (2018) Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change,* 8, 972-980. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2
- CRED-UNISDR (2015). The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995-2015. https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf
- Diakakis, M. (2014). An inventory of flood events in Athens, Greece, during the last 130 years, seasonality and spatial distribution. *J. Flood Risk Manage*. https://doi.org/10.1111/jfr3.12053
- Di Baldassarre, Kreibich, G. H., Vorogushyn, S., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Barendrecht, M., Bates, P., Borga, M., Botzen, W., Bubeck, Ph., De Marchi, B., Llasat, M. C., Mazzoleni, M., Mondino, E., Mård, J., Petrucci, O., Scolobig, A., Viglione, A. and Ward, Ph. J. (2018). An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 22, 5629-5637, https://doi.org/10.5194/hess-22-5629-2018
- Ermolli, I., Matthes, K., Dudok de Wit, T., Krivova, N. A., Tourpali, K., Weber, M., Unruh, Y. C., Gray, L., Langematz, U., Pilewskie, P., Rozanov, E., Schmutz, W., Shapiro, A., Solanki, S. K. and Woods, T. N. (2013). Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling, Atmos. *Chem. Phys*., 13, 3945-3977.
- Gaume, E., Borga, M., Llasat, M. C., Maouche, S., Lang, M. and Miakakis, M. (2016). Mediterranean extreme floods and flash floods. In: AllEnvi (Coord.), *Hydro-meteorological extremes, chapter 3, The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*, 133-144. IRD Éditions Institut de Recherche pour le Développement, Marseille.
- Gilabert, J. y Llasat, M. C. (2017). Circulation weather types associated with extreme flood events in Northwestern Mediterranean. *Int. J. Climatol*. https://doi.org/10.1002/joc.5301
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová1, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A. and Blöschl, G. (2014). Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 18, 2735-2772. https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014
- Insua-Costa, D., Miguez-Macho, G. y Llasat, M.C. (2019). The role of remote and local moisture sources in the two famous 1982 Western Mediterranean torrential rainfall episodes. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 23, 3885-3900. https://doi.org/10.5194/hess-23-3885-2019

- IPCC (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption (SREX)*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Bøssing, O., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Georgopoulou, E., Gobiet, A.,Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E. V., Moseley, C. and Pfeifer, S. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 35, 563-578. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2
- Jansà, A., Alpert, P., Arbogast, P., Buzzi, A., Ivancan-Picek, B., Kotroni, V., Llasat, M. C., Ramis, C., Richard, E., Romero, R., and Speranza, A. (2014). MEDEX: a general overview. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 14, 1965-198. https://doi.org/10.5194/nhess-14-1965-2014
- Kreibich, H., Vorogushyn, S., Aerts, J. C. J. H., Apel, H., Aronica, G. T., Arnbjerg-Nielsen, K., Di Baldassarre, G., Bouwer, L. M., Bubeck, P., Caloiero, T., Chinh, D. T., Cortés, M., Gain, A. K., Giampá, V., Kuhlicke, C., Kundzewicz, Z. W., Llasat, M. C., Mård, J., Matczak, P., Mazzoleni, M., Molinari, D., Dung, N. V., Petrucci, O., Schröter, K., Slager, K., Thieken, A. H., Ward, P. J. and Merz, B. (2017). Adaptation to flood risk – results of international paired flood event studies *Earth's Future* (Special collection "Avoiding Disasters: Strengthening Societal Resilience to Natural Hazards"), 5, 953-965, https://doi.org/10.1002/2017EF000606
- Llasat, M.C., Barriendos, M., Barrera, A. and Rigo, T. (2005). Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology* (Applications of palaeoflood hydrology and historical data in flood risk analysis), 313, 32-47.
- Llasat, M. C. and Siccardi, F. (2010). A reflection about the social and technological aspects in flood risk management – the case of the Italian Civil Protection. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 10, 109-119. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/109/2010/.
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A.A., Rosselló, J., Vinet, F. and Boissier, L. (2013a). Floods in the North-Western Meditrerranean Region: presentation of the HYMEX database and comparison with pre-existing global databases. *La Houille Blanche*, 1, 5-9. https://doi.org/10.1051/lhb/2013001
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A.A., Rosselló, J., Vinet, F. and Boissier, L. (2013b). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods in the framework of the HYMEX project. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 13, 1-14. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1337-2013
- Llasat, M. C., Marcos, R., Turco, M., Gilabert, J. and Llasat-Botija, M. (2016). Trends in flash flood events versus convective precipitation in the Mediterranean region: The case of Catalonia. *Journal of Hydrology*, 541, 24-37.
- Llasat-Botija, M., Cortès, M. and Llasat, M. C. (2018). FLOODUP. Una herramienta para aumentar la información y mejorar el conocimiento colectivo sobre eventos meteorológicos extremos. En: *El Clima: aire, agua, tierra y fuego*, 645-654. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.
- Mangini, W., Viglione, A., Hall, J., Hundecha, Y., Ceola, S., Montanari, A., Rogger, M., Salinas, J. L., Borzì, I. and Parajka, J. (2018). Detection of trends in magnitude and frequency of flood peaks across Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 63(4), 493-512.
- MedECC (2019). Risks associated to climate and environmental changes in the Mediterranean region. Preliminary assessment by the MedECC Network Science-policy interface. https://www.medecc.org/medecc-booklet-isk-associated-to-climate-and-environmental-changes-in-the-mediterranean-region/
- Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L. and Granados, A. (2014). Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *J. Hydrol.*, 517, 1072-1088. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.040

- Merz, B., Vorogushyn, S., Uhlemann, S., Delgado, J. and Hundecha, Y. (2012). HESS Opinions "More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series". *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 16, 1379-1387. https://doi.org/10.5194/hess-16-1379- 2012
- Montanari, A. (2012). Hydrology of the Po River: looking for changing patterns in river discharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.,* 16, 3739-3747. https://doi.org/10.5194/hess-16-3739-2012
- Nakamura, I. and Llasat, M.C. (2017). Policy and systems of flood risk management: a comparative study between Japan and Spain. *Natural Hazards*. 87, 919. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2802-x
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., and van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. Climatic change, 122, 387-400.
- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., Kotroni, V. and Bezes, A. (2015). Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 15, 1859-1871. https://doi.org/10.5194/nhess-15-1859-2015
- Petrucci, O., Aceto, L., Bianchi, C., Bigot, V., Brázdil, R., Pereira, S., Kahraman, A., Kılıç, Ö., Kotroni, V., Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Papagiannaki, K., Pasqua, A. A., Řehoř, J., Rossello Geli, J., Salvati, P., Vinet, F. and Zêzere, J. L. (2019). Flood Fatalities in Europe, 1980–2018: Variability, Features, and Lessons to Learn. *Water*, 11, 1682. https://doi.org/10.3390/w11081682
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Sauquet, E., Prudhomme, C., Parey, S., Paquet, E., Neppel, L. and Gailhard, J. (2008). Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency. *Water Resour. Res*., 44, W08419. https://doi.org/10.1029/2007WR006268
- Tramblay, Y. and Hertig, S. (2018). Modelling extreme dry spells in the Mediterranean region in connection with atmospheric circulation. *Atmospheric research*, 202, 40-48, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.015
- Tramblay, Y. and Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151, 289-302. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5
- Turco, M., Bedia, J., Di Liberto, F., Fiorucci, P., von Hardenberg, J., Koutsias, N., Llasat, M. C., Xystrakis, F. and Provenzale, A. (2016). Decreasing Fires in Mediterranean Europe. *PLoS ONE*, 11(3), e0150663. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150663
- Turco, M., Rosa-Cánovas, J. J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J. P., Llasat, M. C. and Provenzale, A. (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with nonstationary climate-fire models. *Nature Communications*, 9, 3821. https://doi.org/10.1038/s41467-018-06358-z

DANA 2019 Y ASPECTOS RELATIVOS A LA ESTIMACIÓN Y TRATAMIENTO DEL RIESGO ASOCIADO A INUNDACIONES

Luis Altarejos García
luis.altarejos@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-4427-3698

Juan T. García Bermejo
juan.gbermejo@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-7204-688X

José María Carrillo Sánchez
jose.carrillo@upct.es
https://orcid.org/0000-0003-4264-3269

Juan Manuel García-Guerrero
jm.guerrero@upct.es
http://orcid.org/0000-0001-7784-0284

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena, España

RESUMEN

El episodio DANA de los días 12 a 16 de septiembre de 2019 provocó importantes inundaciones en el sur de Alicante y Región de Murcia. En el presente trabajo se muestra un intento de estimación del periodo de retorno de las máximas precipitaciones diarias registradas utilizando la metodología recogida en el Mapa de Máximas Lluvias en la España Peninsular, de 1999. Partiendo de los resultados obtenidos, se revisan algunos aspectos relativos a la estimación y tratamiento del riesgo asociado a inundaciones, utilizando el enfoque de la ISO 31000, incidiendo en la naturaleza multidimensional del riesgo, las opciones de tratamiento del riesgo y la determinación del riesgo residual. Se repasan los componentes de la evaluación del riesgo, incluyendo las probabilidades de eventos, respuesta del sistema, exposición y consecuencias.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los días 9 y 16 del mes de septiembre de 2019 tuvo lugar un episodio meteorológico del tipo Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) que afectó principalmente a las provincias de Alicante, Almería, Murcia, Valencia, áreas de Baleares y parte de la zona centro peninsular. Este episodio DANA estableció a escala sinóptica y durante varios días un marco propicio para que, a un nivel regional inferior o de mesoescala, se produjeran fenómenos como los trenes de tormentas (12 de septiembre) y los Sistemas Convectivos de Mesoescala, SMC (13 de septiembre) que fueron los causantes últimos de las lluvias torrenciales en la Región de Murcia y sur de la provincia de Alicante (Martín León, 2019). El evento se caracterizó por su gran extensión, fuerte intensidad con valores de precipitaciones horarias muy altos, gran volumen total de agua precipitado y persistencia, con precipitaciones acumuladas en periodos de 24 a 48 horas de gran magnitud, correspondientes a la combinación de trenes de tormentas y SMC. Esta combinación de extensión, intensidad, volumen y

persistencia es un factor decisivo para entender la respuesta hidrológica del territorio, que en forma de inundaciones ha causado cuantiosos daños en las zonas afectadas. A raíz del fenómeno se han puesto en marcha diversas iniciativas por parte de las diferentes administraciones y partes interesadas en la gestión del riesgo de inundación.

El marco normativo para la gestión del riesgo de inundación es el Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 2007/60CE de evaluación y gestión de los riesgos de inundación, de la Comisión Europea. De acuerdo con la normativa es obligatorio elaborar mapas de peligrosidad y mapas de riesgo de inundación, así como planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI) que implican la determinación de las zonas para las cuales existe un riesgo potencial de inundación significativo en base al estudio de la información disponible sobre inundaciones históricas, estudios de zonas inundables, impacto del cambio climático, planes de protección civil, ocupación actual del suelo, así como las infraestructuras de protección frente a inundaciones existentes. Se establecen unos baremos de riesgo por peligrosidad y exposición que permiten valorar los daños identificados.

En la primera parte del presente trabajo se describe someramente el fenómeno de septiembre de 2019, únicamente en el ámbito del territorio de la Confederación Hidrográfica del Segura, y se aborda la estimación de los periodos de retorno que resultarían asociados a los registros observados en diversos pluviómetros utilizando los mapas de lluvias habitualmente empleados en la España Peninsular (Ministerio de Fomento, 1999). La segunda parte del trabajo repasa diversos aspectos relacionados con la gestión del riesgo asociado a la ocurrencia de episodios de inundación, incluyendo la estimación de la probabilidad de los eventos, la respuesta del sistema, la importancia de las infraestructuras de defensa, la estimación del grado de exposición y la probabilidad de las consecuencias.

2. EL EVENTO DE SEPTIEMBRE DE 2019

2.1. Descripción del evento

2.1.1. Situación sinóptica

La DANA de los días 12-16 de septiembre se originó por un desprendimiento de aire frío desde la circulación polar de niveles altos, debido a una corriente en chorro o “jet” de gran intensidad y orientación norte a sur, que condicionó la intensidad de la DANA. Esta situación se produjo en un contexto de temperatura y humedad altas en la zona Mediterránea (Fig.1).

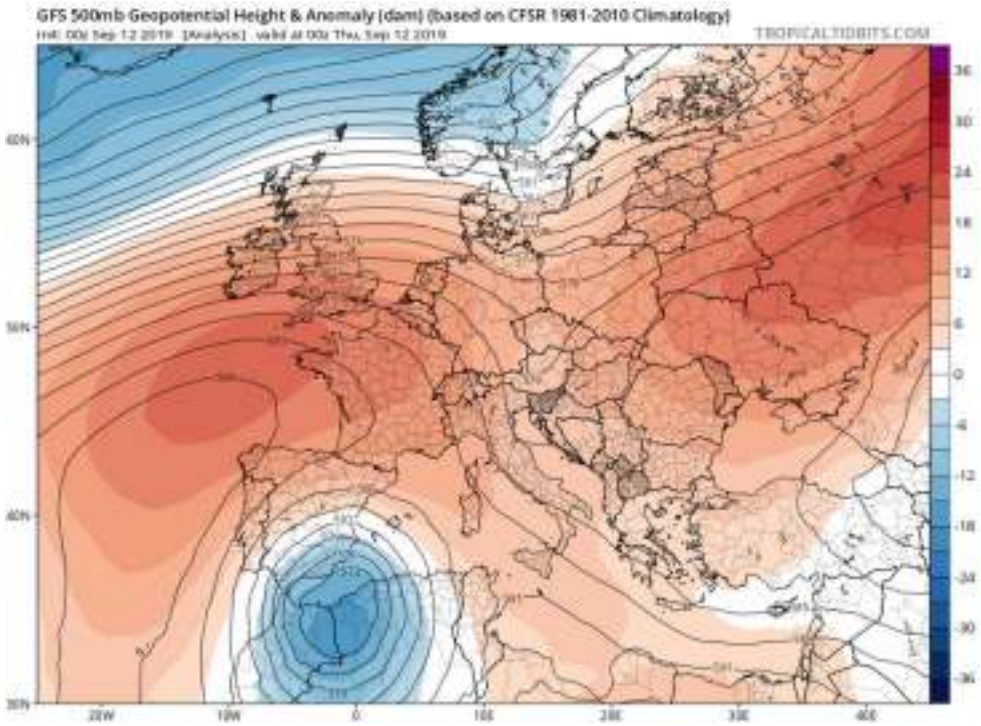
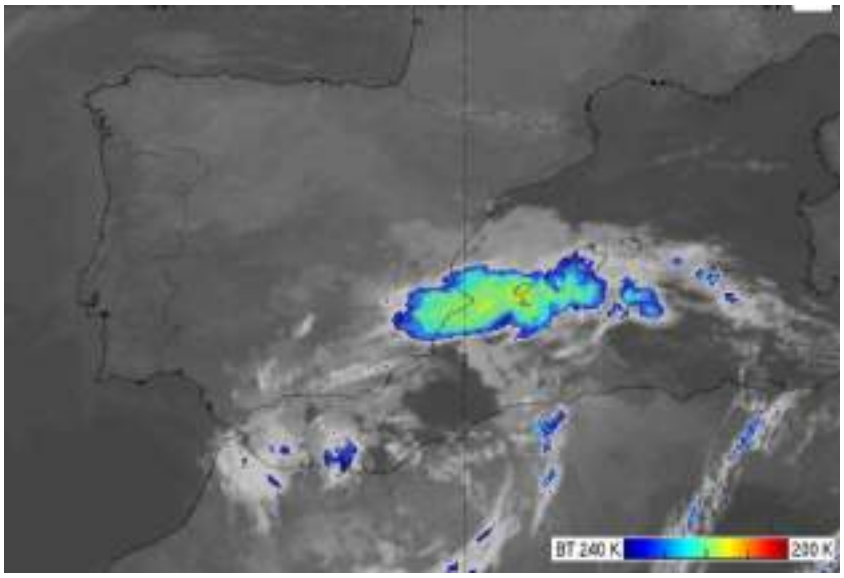


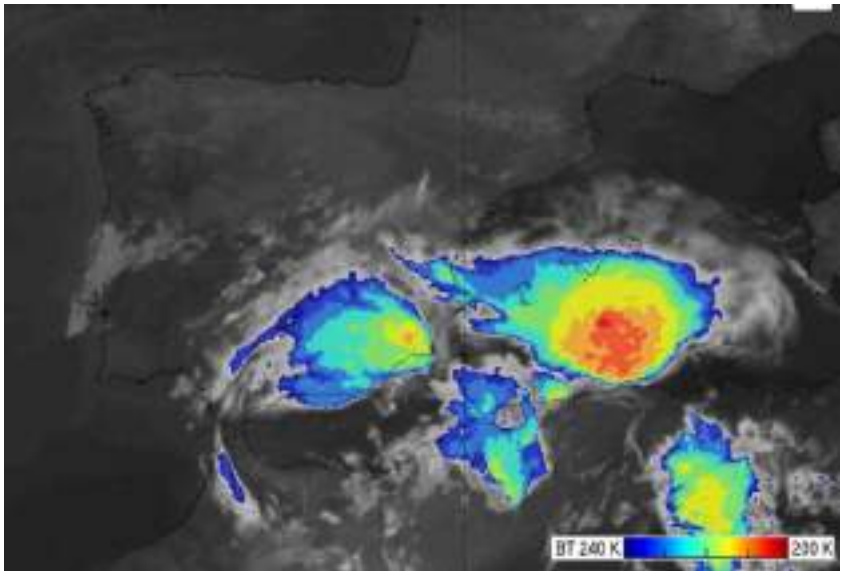
Figura 1. Altura geopotencial de la isobara de 500 mb el 12 de septiembre de 2019 Fuente: Martín Leon, 2019.

Una vez originada la DANA, las condiciones generales, en especial el potente anticiclón en el centro de Europa, favorecieron el aislamiento de la depresión aislada y su lenta evolución. El desarrollo de fenómenos convectivos fue favorecido de este modo por las condiciones de humedad e inestabilidad y variación de la velocidad del viento con la altura.

El día 12 de septiembre se produjo un fenómeno que se ha asimilado a un tren de tormentas (Fig.2), lo que provocó que por una misma zona discurriera un conjunto de tormentas, una detrás de otra. Por otro lado, el día 13 de septiembre se pudo organizar un Sistema Convectivo de Mesoescala (SMC). Un SMC supone la organización de un conjunto de focos convectivos y tormentas, que dan lugar a una estructura mucho mayor que la de una tormenta normal (Fig.2).



(a) Tren de tormentas, día 12 de septiembre



(b) Sistema Convectivo de Mesoescala, día 13 de septiembre

Figura 2. Fenómenos tormentosos y convectivos de los días 12 y 13 de septiembre de 2019. Fuente: Martín Leon, 2019.

2.1.2. Precipitaciones

De acuerdo con los datos del SAIH de la Confederación Hidrográfica del Segura, sobre las 9 horas del día 12/09/2019 empezaron a producirse lluvias generalizadas en la cuenca del Segura, aumentando su intensidad a partir de las 12 horas del 12/09/2019, llegándose a registrar precipitaciones acumuladas en 24 horas superiores a 100 mm en 67 pluviómetros de la cuenca. En la Figura 3 se puede observar la distribución espacial de la precipitación acumulada durante el evento entre los días 12 y 16 de septiembre de 2019. Utilizando como criterio la precipitación total acumulada, a partir de la Figura 3 se puede dividir el territorio en 4 zonas: (1) margen izquierda del Segura, (2) zona alta del Segura, (3) zonas media y baja del Segura y ramblas del Mar Menor, y (4) resto de la cuenca.

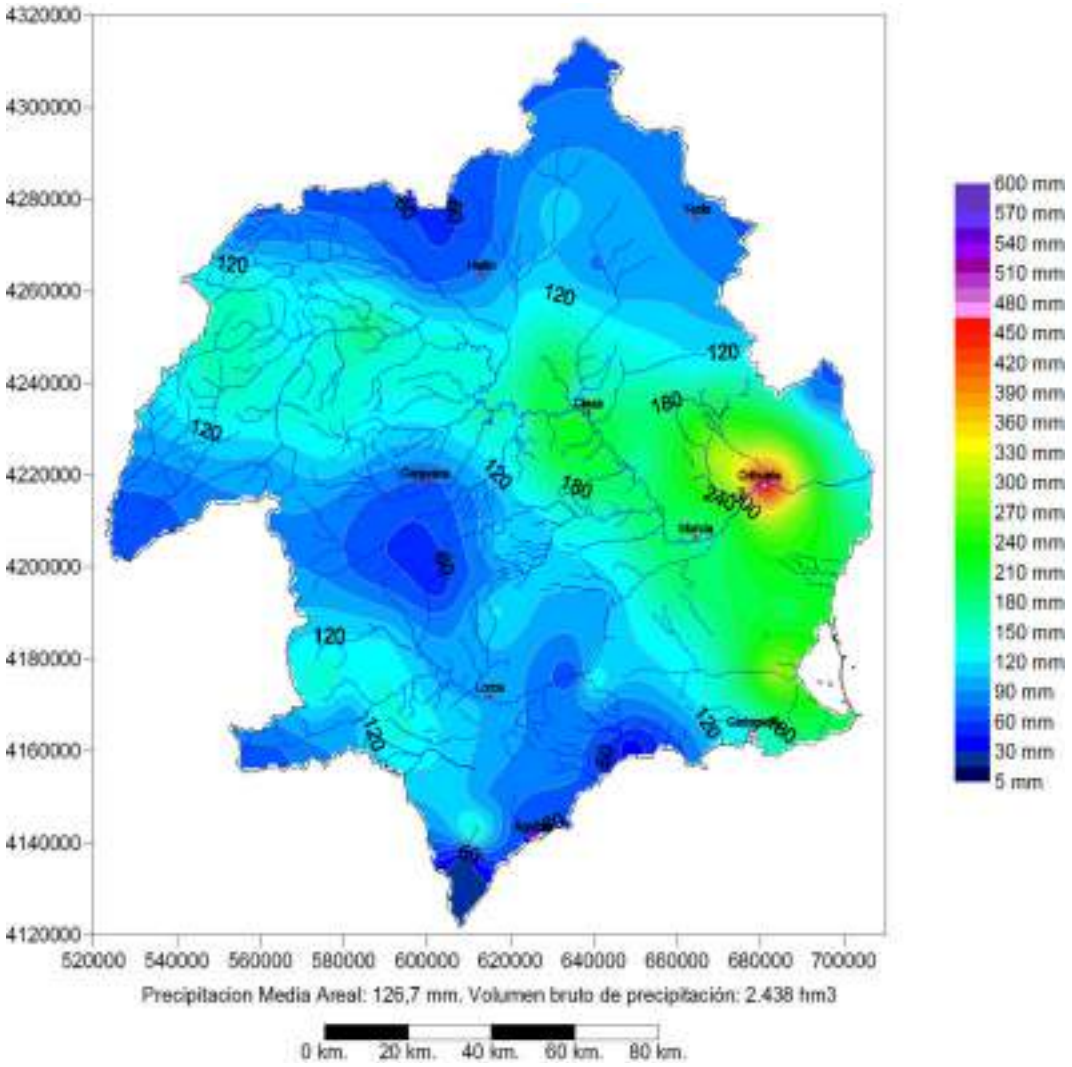


Figura 3. Distribución espacial de la precipitación acumulada entre los días 12/09/2019 08:00 y 16/09/2019 08:00. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.

En la zona (1), situada en la parte norte y que corresponde a las cabeceras de los afluentes por margen izquierda del Segura la precipitación total acumulada ha sido inferior a 100-120 mm. En la zona (2) correspondiente a la zona alta del valle del Segura la precipitación acumulada ha sido del orden de 200-220 mm. En la zona (3) que comprende la Vega Media y la Vega Baja del valle del Segura, así como las ramblas del entorno del Mar Menor, la precipitación acumulada ha sido de entre 220-320 mm. De forma excepcional, en el entorno de la población de Orihuela, este valor sube hasta los 480 mm. Finalmente, en la zona (4) que comprendería el resto de la cuenca, incluyendo las cabeceras de los afluentes por margen derecha del Segura, todo el Guadalentín, y las ramblas costeras de la parte sur, la precipitación total acumulada ha sido inferior a 100-120 mm.

Los puntos en los que se registraron las mayores precipitaciones se muestran en la Tabla 1 (ordenados por subcuenca y precipitación). Se incluye también la tabla el dato de máxima precipitación acumulada registrada en 24 horas consecutivas y el porcentaje que esta precipitación en 24 horas ha supuesto sobre el volumen total del evento.

Subcuenca	Punto	Precipitación acumulada entre el 12 y el 16 de septiembre $P_{4\ días}$ (mm)	Máxima precipitación acumulada en 24 horas consecutivas, P_{24} (mm)	P_{24} / $P_{4\ días}$ (%)
Cabecera	Pl.A.El Gallego	192.6	138.9	72.1
Zona Alta 1	PL.Venta Olivo	221.8	139.0	62.7
	PL.Las Caras	211.2	171.6	81.3
	Pl.Almadenes	207.8	159.6	76.8
	Pl.E.Cárcabo	207.2	162.6	78.5
	Pl.Cieza	207.0	152.0	73.4
	Pl.E.Moro	202.5	159.8	78.9
Zona Alta 2	Pl.E.Mayés	205.2	171.3	83.5
	Pl.Ojós	200.2	155.6	77.7
Zona Media	Pl.Cab.C.Crevillente	303.4	224.5	74.0
	Pl.E.Santomera	259.4	252.2	97.2
	Pl.Beniel	236.2	227.6	96.4
	Pl.Reguerón	202.4	191.2	94.5
	Pl.Contraparada	194.3	176.7	90.9
	Pl. Relojero-Ametse	192.4	179.0	93.0
Zona Baja	Pl. Orihuela	486.6	461.2	94.8
	Pl.Jacarilla	362.4	313.8	86.6
	Pl.E.La Pedrera	290.4	267.6	92.1
	Pl.ETAP Torrealta	262.8	211.4	80.4
	Pl.Baños Fortuna	240.0	185.2	77.2
Ramblas Costeras	Pl.La Puebla	298.1	292.9	98.3
	Pl.Pozo Estrecho	238.2	235.0	98.7
	Pl.CPCCartagena	225.3	224.5	99.6
	Pl.Torre Pacheco	221.2	218.0	98.6
	Pl.San Javier	201.4	199.7	99.2

Tabla 1. Puntos con mayores precipitaciones acumuladas entre el 12 y el 16 de septiembre de 2019. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.

En 24 de los 25 pluviómetros mostrados en la Tabla 1 se dio el hecho de que más de un 70 % de la precipitación total se produjo de forma concentrada en 24 horas consecutivas. Este porcentaje de concentración de lluvia se eleva por encima del 90 % en 12 de los 25 pluviómetros, llegando al 95 % en Orihuela, y alcanza valores superiores al 98 % en los 5 pluviómetros pertenecientes a la zona de Ramblas Costeras. Para entender la estructura interna de la distribución temporal de la precipitación se muestra en la Figura 4 los hietogramas de los pluviómetros que recogieron la máxima precipitación acumulada en cada subcuenca: El Gallego (Cabecera), Venta Olivo (Zona Alta 1), Mayés (Zona Alta 2), Crevillente (Zona Media), Orihuela (Zona Baja) y La Puebla (Ramblas Costeras), correspondientes a 4 días, entre el 12 y el 16 de septiembre.

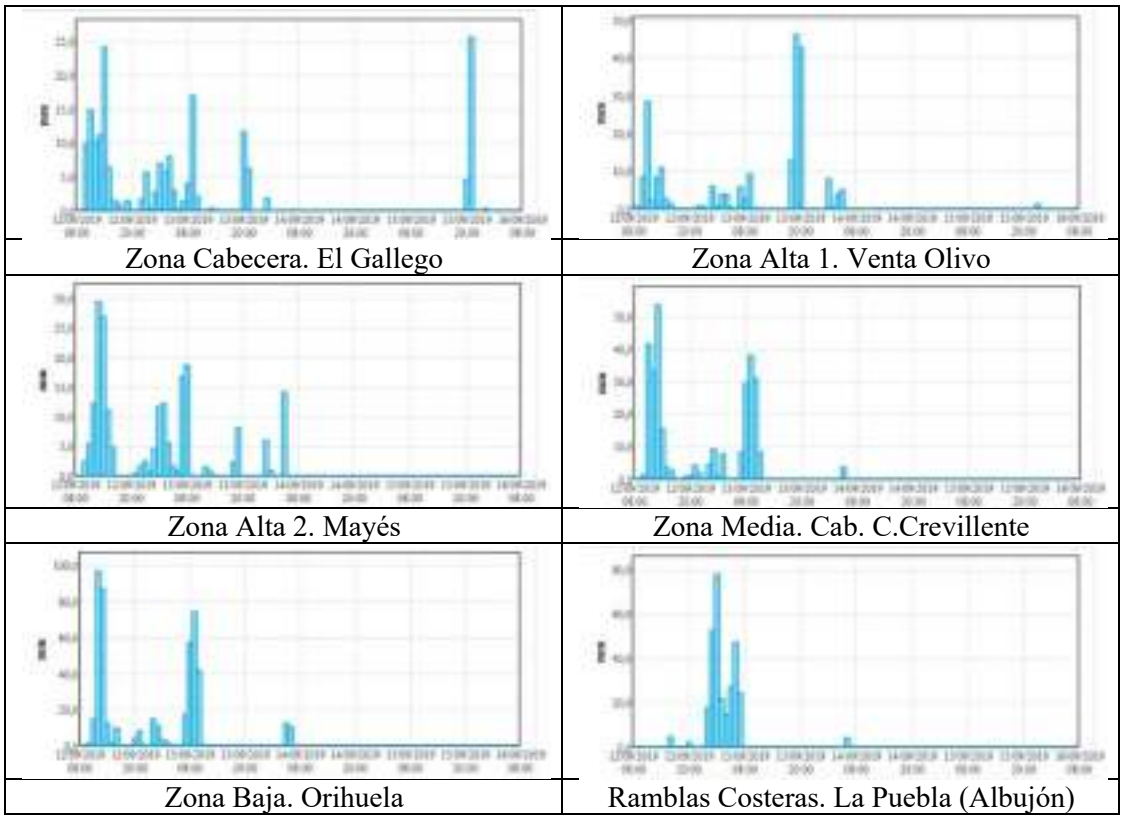


Figura 4. Hietogramas de precipitación en distintas zonas entre el 12 de septiembre a las 08:00 horas y el 16 de septiembre a las 08:00 horas. Fuente: SAIH, Confederación Hidrográfica del Segura.

Se observa que las precipitaciones se concentraron principalmente en los días 12 y 13 de septiembre. Como excepción, en el pluviómetro de El Gallego, situado en la zona de Cabecera, se registraron precipitaciones de cierta intensidad también el día 15 de septiembre.

A la vista de los hietogramas, se comprueba que entre los días 12 y 13 de septiembre se produjo el paso de una serie de tormentas consecutivas con dirección este-oeste, que produjeron picos simultáneos de distinta intensidad en la cuenca en 3 momentos: (1) mediodía del día 12, (2) medianoche del 12 al 13, y (3) sobre las 8 horas de la mañana del día 13. Además, en las zonas de Cabecera y Alta hubo un cuarto pico de intensidad el día 13 hacia las 20 horas.

La primera tormenta del día 12 provocó precipitaciones entre las 9 y las 18 horas, con picos horarios de precipitación hacia el mediodía. Estos picos fueron de casi 100 mm/h en Orihuela, más de 50 mm/h en la Vega Media, de 30 mm/h en la Zona Alta y de 25 mm/h en Cabecera. Esta tormenta apenas se dejó sentir en la zona de las Ramblas Costeras.

El paso de una segunda tormenta se produjo en las últimas horas del día 12 de septiembre y en la madrugada del día 13 de septiembre, con picos horarios moderados, inferiores a 20 mm/h en todas las zonas, excepto en la zona de las Ramblas Costeras, donde la tormenta alcanzó una gran intensidad, con picos horarios de 80 mm/h en la zona de la rambla del Albujón.

Una tercera tormenta de gran magnitud se produjo inmediatamente a continuación de la anterior, que se centró en las Vegas Media y Baja y en el Campo de Cartagena. Las precipitaciones comenzaron sobre las 6 horas del día 13 de septiembre y dejaron picos de precipitación muy importantes hacia las 9 horas, con valores de 80 mm/h en Orihuela y de 50 mm/h en las Ramblas Costeras. En la Zona Alta

el evento tuvo un menor impacto, con intensidades de entre 20 y 10 mm/h. Este tercer evento se dejó sentir de lleno en la zona de las Ramblas Costeras, ya que se solapó prácticamente sin solución de continuidad con el anterior, dando lugar a una concentración de precipitaciones de gran magnitud, con dos picos de intensidad muy marcados, uno de 80 mm/h a las 2 horas de la madrugada y otro de 50 mm/h a las 7 horas de la mañana.

En la Tabla 2 se muestra las precipitaciones recogidas los días 12 y 13 de septiembre de 2019, la precipitación máxima acumulada en 24 horas consecutivas y la relación entre la máxima precipitación diaria registrada y la máxima precipitación en 24 horas.

Como se puede observar a partir de la información mostrada en la Tabla 2, las precipitaciones fueron muy abundantes los días 12 y 13 de septiembre, pero especialmente virulentas el 12. Las máximas precipitaciones registradas el día 12 en cada zona fueron de 121 mm (Cabecera), 171 mm (Zona Alta), 222 mm (Zona Media), 346 mm (Orihuela, Vega Baja) y 293 mm (Albujón, Campo de Cartagena). Las máximas precipitaciones registradas el día 13 en cada zona fueron de 40 mm (Cabecera), 130 mm (Zona Alta), 100 mm (Zona Media), 183 mm (Embalse de La Pedrera, Vega Baja) y 38 mm (Campo de Cartagena). Sin embargo, el análisis horario de los hietogramas muestra que las precipitaciones en la zona de Orihuela parecen responder a 3 eventos consecutivos, con separación entre picos de 12 horas (entre primero y segundo) y de 8 horas (entre segundo y tercero), concentrados por tanto en menos de 24 horas. El análisis horario de los hietogramas en la zona del Campo de Cartagena parece mostrar 2 eventos consecutivos, con separación entre picos de unas 4-5 horas.

Por otro lado, de la relación P_{24}/P_d se observa que presenta valores cercanos a 1 en Cabecera, Zona Alta y mayor parte de las Ramblas Costeras, mientras que en la Zona Baja presenta valores significativamente altos, en el rango de 1.3 a 1.5.

Subcuenca	Punto	P diaria 12 sep (mm)	P diaria 13 sep (mm)	Máxima P acumulada en 24 horas consecutivas (mm)	Max P_{24} / Max P diaria
Cabecera	Pl.A.El Gallego	121.4	40.3	138.9	1.14
Zona Alta 1	PL.Venta Olivo	90.0	130.2	139.0	1.07
	PL.Las Caras	170.6	40.6	171.6	1.01
	Pl.Almadenes	159.6	48.2	159.6	1.00
	Pl.E.Cárcabo	162.6	44.6	162.6	1.00
	Pl.Cieza	152.0	54.8	152.0	1.00
	Pl.E.Moro	159.8	42.8	159.8	1.00
Zona Alta 2	Pl.E.Mayés	171.1	34.3	171.3	1.00
	Pl.Ojós	155.2	45.0	155.6	1.00
Zona Media	Pl.Cab.C.Crevillente	222.0	81.4	224.5	1.01
	Pl.E.Santomera	221.6	37.8	252.2	1.14
	Pl.Beniel	136.2	100.0	227.6	1.67
	Pl.Reguerón	188.8	13.6	191.2	1.01
	Pl.Contraparada	172.4	21.7	176.7	1.02
	Pl. Relojero-Ametse	175.5	16.8	179.0	1.02
Zona Baja	Pl. Orihuela	346.2	140.4	461.2	1.33
	Pl.Jacarilla	212.2	150.2	313.8	1.48
	Pl.E.La Pedrera	107.6	182.8	267.6	1.46
	Pl.ETAP Torrealta	164.8	98.0	211.4	1.28
	Pl.Baños Fortuna	134.8	105.2	185.2	1.37
Ramblas Costeras	Pl.La Puebla	292.9	5.2	292.9	1.00
	Pl.Pozo Estrecho	235.0	3.2	235.0	1.00
	Pl.CPCCartagena	186.9	38.4	224.5	1.20
	Pl.Torre Pacheco	218.0	3.2	218.0	1.00
	Pl.San Javier	198.3	3.2	199.7	1.01

Tabla 2. Máxima precipitación diaria, Pd, días 12 y 13 de septiembre de 2019, máxima precipitación acumulada en 24 horas y relación entre ambas.

2.2. Comparación con eventos registrados en la zona

La ocurrencia de precipitaciones de gran magnitud en toda la vertiente mediterránea de la Península y en particular en el sureste español ha sido un hecho frecuente y bien documentado a lo largo de la historia (Ferreras, 2004).

A continuación, se muestra un resumen de los principales eventos históricos registrados, con la intención de poner en contexto el evento de septiembre de 2019. Se ha incluido únicamente datos relevantes desde 1900, con especial énfasis en el periodo más reciente, desde 1980, para el que se dispone de mejor información. Se muestra el análisis para los siguientes periodos: 1900-1979, 1980-1999 y 2000-2018.

2.2.1. Periodo 1900-1980

En la Tabla 3 se muestra un extracto de los eventos más relevantes (Ferreras, 2004). Como se puede observar, un número de episodios de inundación cada 10 años de entre 2-3 y hasta 5-6 ha sido registrado regularmente.

Año	Descripción
1900	Hay documentados 4 episodios de crecidas: febrero (3 días), junio (4 días), septiembre y octubre (6 días).
1904	Febrero. Crecida en el Segura.
1905	Septiembre. Crecida en el Segura
1906	Septiembre. Inundaciones en Cartagena y huertas de Murcia y Orihuela.
1916	Hay 2 episodios de inundaciones: noviembre y diciembre.
1919	Septiembre. Inundaciones en la cuenca del Segura. Inundación en Cartagena.
1921	Hay documentados 3 episodios: mayo, septiembre y octubre.
1923	Octubre.
1924	Hay documentados varios episodios de inundaciones en la cuenca del Segura: febrero-marzo, abril y octubre.
1925	Diciembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1926	Noviembre (2 días). Inundaciones en la cuenca del Segura.
1927	Diciembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1929	Septiembre (4 días). Inundaciones en la cuenca del Segura.
1930	Hay 2 episodios de inundaciones: febrero y noviembre.
1931	Septiembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1939	Septiembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1941	Septiembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1943	Octubre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1944	Diciembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1946	Diciembre. Crecida del río Segura.
1947	Septiembre. Grandes inundaciones del Segura.
1948	Octubre. Inundaciones del Segura en Murcia e inundaciones en Cartagena y huerta de Murcia.
1952	Octubre. Inundaciones en campos de Murcia y Cartagena.
1957	Octubre. Intensas lluvias que produjeron inundaciones en el sureste español.
1965	Diciembre. Inundaciones en la cuenca del Segura.
1966	Octubre. Inundaciones.
1969	Octubre. Crecida del Segura en Murcia.
1972	Octubre. Inundaciones en la Huerta murciana, en Lorca, en Cartagena y en la Vega Baja con víctimas y que arruinan 1.000 casas. En San Javier se midieron 262 mm.
1973	Octubre. grandes inundaciones provocan daños muy importantes en las provincias de Almería, Granada, y Murcia. Unas 200 personas pierden la vida. Los municipios de La Rábita (Granada) y Puerto Lumbreras (Murcia), quedaron arrasados.
1977	Octubre. Inundaciones en el sureste peninsular

Tabla 3. Eventos relevantes en el periodo 1900-1980. Fuente: Ferreras, 2004.

2.2.2. Periodo 1980-2000

Las características más relevantes desde el punto de vista de la precipitación para las principales avenidas en el periodo 1980-1999 se resumen en la Tabla 4 (Maurandi y Romero, 2000). En dicha tabla se ha incluido en la última columna para su comparación los valores de precipitación total registrados en el evento de septiembre de 2019.

	Estación	1982 Oct	1986 Jul	1986 Oct 1ª	1986 Oct 2ª	1987 Nov	1988 Nov	1989 Sep	1997 Oct	2019 Sep
Cabecera río Segura	Miller	68	41	51	10	38	18	76	121	
	Fuensanta	84	56	30	36	76	24	114	215	120
	Taibilla					69	42	99	113	141
	Cenajo	103	109	48	137	108	84	145	130	151
Río Mundo	Lietor					23	73	93	244	78
	Talave	135	66	27	148	69	65	123	156	67
	Camarillas	94	128	42	80	102	63	150	106	138
Altiplano	Yecla	68	94	37	59					
	Jumilla	127	143	43	51	50	48	71	45	105
Vega Alta	Moratalla	99	70	51	17	64		40	96	152
	Argos	106	7	90	84	174	79	179	152	170
	Alfonso XIII	103	13	61	54	138	73	136	106	131
	Almadenes	95	10	63	43	147	80	143	104	208
	Azud Ojós	65	4	69	51	128	68	177	81	200
	Mayés	74	5	71	73	160	98	83	69	205
	La Cierva	60		106	194	305	110	97	120	153
Guadalentín	Valdeinfierno	87	1	82	110	41	16	134	133	119
	Puentes	60	24	78	56	22	6	129	94	92
	Lorca	51	14	81	2	38	26	81	137	104
	Totana	76	8	153	6	33	46	143	120	125
Vega Media	El Palmar	78	2	165	46	199	15	123	146	
	Guadalupe					134	11	96	83	
	Murcia	62	3	137	37	136	11	106	88	173
	Santomera	59	5	115	16	181	17	150	97	259
Vega Baja	Orihuela	67	1	87	30	311	15	176	30	487
	La Pedrera	53	1	111	81	242	12	207	124	290
	Almoradí	50		108	74		27	121	83	
Campo de Cartagena	San Javier	59	1	207	10	304	3	130	97	201
	Cartagena	75	2	92	4	27	3	42	122	225

Tabla 4. Precipitaciones registradas en las inundaciones del periodo 1980-2000 y en el evento de septiembre de 2019. Fuente: Maurandi y Romero, 2000.

2.2.3. Periodo 2000-2018

El análisis del periodo 2000-2018 se ha elaborado a partir de trabajos publicados por diversos autores que han analizado los episodios de precipitación más importantes en este periodo en la Región de Murcia (Castejón y Romero, 2014; Espín Sánchez et al., 2017). Partiendo de la información allí recogida se ha elaborado la Tabla 5, que incluye 8 episodios de precipitación y en la que se ha incluido para su comparación el episodio de 2019.

2.2.4. Comparación

Para el periodo 1900-1979 no se han comparado precipitaciones, únicamente se han listado los principales eventos de inundación. Algunos autores han afirmado que:

> *Las grandes inundaciones de las que hay constancia y que ha padecido la cuenca del Segura a lo largo de los tiempos se deben a precipitaciones máximas de intensidades muy elevadas de 30 a 125 litros/m^2 en 24 horas y que suelen registrarse en los meses de octubre y noviembre* (Ferreras, 2004).

De este modo, se podría concluir que las precipitaciones generalizadas ocurridas en septiembre de 2019, con amplias zonas de la cuenca por encima de los 100-120 mm, estaría a la altura de los mayores eventos históricos registrados.

	Estación	2000 Oct	2003 Oct	2009 Sep	2010 Ago	2011 Nov	2012 Sep	2014 Sep	2016 Dic	2019 Sep
Altiplano	Yecla					57	65		90	
	Jumilla	76	43				69			105
Vega Alta	Moratalla	109								152
	Azud Ojós			39		57				200
Guadalentín	Valdeinfierno						117			119
	Puentes									92
	Lorca	137		42	38		145		120	104
	Totana	113		43	64		116			125
Vega Media	Murcia	121		44		40	102		210	173
	Santomera								160	259
Campo de Cartagena	San Javier	60		55		78	42		200	201
	Cartagena			160			58		170	225

Tabla 5. Precipitaciones registradas en las inundaciones del periodo 2000-2019. Fuente: Castejón y Romero (2014) y Espín Sánchez at al. (2017).

Para poner en contexto el evento de septiembre de 2019 con los registrados en el periodo de 1980-1999, se puede comprobar que en la Cabecera del río Segura el evento de 2019 ha sido el 2º de más importancia, tras el de 1997. En la zona del río Mundo y Altiplano estaría al nivel de los eventos de 1982, 1986, 1987 y 1997.

En la zona de la Vega Alta, se puede comprobar que el evento de 2019 ha sido superior a cualquiera de los registrados en este periodo, mientras que en la zona del Guadalentín estaría un poco por debajo de los eventos de 1989 y 1997. Para las zonas de la Vega Media, Vega Baja y Campo de Cartagena, el evento de 2019 ha sido superior en general a cualquiera de los registrados en este periodo, salvo para el caso de San Javier, donde las mayores precipitaciones tuvieron lugar en 1987.

En el caso del periodo 2000-2018, se puede comprobar que la zona del Campo de Cartagena ya sufrió precipitaciones de gran magnitud en diciembre de 2016, aunque algo inferiores a las de 2019. El

episodio lluvioso del 17 y 18 de diciembre de 2016 es considerado como uno de los más significativos acaecidos en el Sureste Peninsular durante las dos últimas décadas, en particular en el área vertiente del Mar Menor, donde se produjeron las inundaciones más importantes. El episodio de 2019 resulta relevante pues no sólo por su intensidad sino por su gran extensión geográfica.

2.3. Aproximación a la magnitud del evento

A la vista de los registros de precipitación asociados al evento de septiembre de 2019, resulta de interés estimar o acotar la probabilidad de ocurrencia asociada a los mismos. En España la referencia para determinar la probabilidad de ocurrencia asociada a precipitaciones diarias es la publicación "Máximas lluvias diarias en la España Peninsular", (Ministerio de Fomento, 1999). En ella se proporciona el valor de la precipitación diaria, $P_d(T)$, asociada a un determinado periodo de retorno, T (hasta 500 años), para cualquier punto del territorio de la España Peninsular. La función de probabilidad empleada es la denominada SQRT-ET max, que es una función de 2 parámetros propuesta específicamente para modelar Series Anuales de Máximos (SAM) de lluvias diarias. Para cada pluviómetro, los 2 parámetros que definen la función (α: parámetro de escala; k: parámetro de forma) pueden estimarse a partir del valor de la media, μ, y del coeficiente de variación, Cv, de la serie de datos, que son valores que se pueden obtener para cada punto del territorio desde el mapa correspondiente. Conocida la función, es posible:

- Obtener la precipitación diaria asociada a un periodo de retorno dado
- Obtener el periodo de retorno asociado a una precipitación diaria observada

Se han estimado de este modo los periodos de retorno asociados a los registros de precipitación. En primer lugar, se han considerado los periodos de retorno correspondientes a los registros de los días 12 y 13 de septiembre (Tabla 6).

Si se considera el análisis en términos de precipitación diaria se observa que en las zonas de Cabecera y Zona Alta los periodos de retorno van desde los 293 años (Pl. Almadenes, 12 de septiembre) a valores inferiores a 2 años (Pl. El Gallego, 13 de septiembre). Para la Zona Media los valores van desde entre los 1,123 años (Pl. Cab. Crevillente, 12 de septiembre) a valores inferiores a 2 años en diversos puntos el 13 de septiembre. La situación cambia para la Vega Baja, donde los registros se incrementan con dos pluviómetros con valores excepcionales de 18,395 años en Orihuela el 12 de septiembre. Para la zona de las Ramblas Costeras se está entre 200 y 1,000 años de periodo de retorno, con un valor excepcional de 7,105 años en el pluviómetro de La Puebla, en la Rambla del Albujón.

Cuando no se dispone de registros de precipitación a escala sub-diaria, los valores de precipitación máxima diaria anual se pueden transformar a valores de precipitación máxima en 24 horas anual. Esto es debido a que la división en días fijos es arbitraria (ya sea como días naturales de 0-24 horas, o como días a efectos de registros de precipitación de 8 a.m a 8 a.m.) y no captura realmente la máxima precipitación en 24 horas consecutivas. Así, un determinado evento puede comenzar antes de las 8 a.m. y terminar después, de modo que el volumen total asociado quedaría repartido entre dos días en la toma de datos, enmascarando de algún modo la verdadera magnitud de la precipitación.

Para tener en cuenta este hecho, la Organización Mundial de Meteorología recomienda multiplicar los valores de registrados de precipitación máxima diaria anual por un coeficiente de 1.13 para obtener la precipitación máxima en 24 horas anual (WMO, 2009). Esta corrección está basada en los estudios realizados sobre miles de estaciones pluviométricas en todo el mundo y fue propuesta inicialmente por Weiss en 1964.

Subcuenca	Punto	12/09/2019 (08:00-08:00h)		13/09/2019 (08:00-08:00h)	
		P (mm)	T (años)	P (mm)	T (años)
Cabecera	Pl.A.El Gallego	121.4	50	40.3	-
Zona Alta 1	PL.Venta Olivo	90.0	22	130.2	113
	PL.Las Caras	170.6	262	40.6	2
	Pl.Almadenes	159.6	293	48.2	3
	Pl.E.Cárcabo	162.6	289	44.6	2
	Pl.Cieza	152.0	161	54.8	3
	Pl.E.Moro	159.8	175	42.8	2
Zona Alta 2	Pl.E.Mayés	171.1	180	34.3	-
	Pl.Ojós	155.2	136	45.0	2
Zona Media	Pl.Cab.C.Crevillente	222.0	1,123	81.4	10
	Pl.E.Santomera	221.6	460	37.8	-
	Pl.Beniel	136.2	66	100.0	18
	Pl.Reguerón	188.8	254	13.6	-
	Pl.Contraparada	172.4	174	21.7	-
	Pl. Relojero-Ametse	175.5	176	16.8	-
Zona Baja	Pl. Orihuela	346.2	18,395	140.4	76
	Pl.Jacarilla	212.2	757	150.2	116
	Pl.E.La Pedrera	107.6	24	182.8	289
	Pl.ETAP Torrealta	164.8	228	98.0	21
	Pl.Baños Fortuna	134.8	83	105.2	28
Ramb. Costeras	Pl.La Puebla	292.9	7,105	5.2	-
	Pl.Pozo Estrecho	235.0	993	3.2	-
	Pl.CPCCartagena	186.9	266	38.4	-
	Pl.Torre Pacheco	218.0	627	3.2	-
	Pl.San Javier	198.3	368	3.2	-

Tabla 6. Periodos de retorno estimados para las máximas precipitaciones diarias de los días 12 y 13 de septiembre de 2019.

Así, se ha realizado el ejercicio de multiplicar la máxima precipitación diaria registrada y estimar el periodo de retorno correspondiente. Además, puesto que se dispone de la máxima precipitación registrada en 24 horas consecutivas, también se ha estimado el periodo de retorno que le correspondería y para compararlo con el obtenido al utilizar la máxima precipitación registrada en un intervalo fijo corregida por el coeficiente del WMO (Tabla 7).

Si se realiza un análisis en términos de precipitaciones en 24 horas consecutivas, los valores de periodo de retorno son mucho mayores que para la máxima precipitación diaria. Así, en las zonas de Cabecera y Zona Alta todos los periodos de retorno están entre 100 y 300 años. Para la Zona Media los valores se encontrarían entre 200 y más de 1,000 años de periodo de retorno. Aún más extremo es el caso de la Vega Baja, donde los valores estarían entre 500 y 3,000 años de periodo de retorno, con un valor en el pluviómetro de Jacarilla del orden de 10,000 años de periodo de retorno.

Subcuenca	Punto	Máxima P acumulada en 24 horas consecutivas registrada (mm)		Máxima P en 24 horas escalando un 13 % la máxima la P diaria registrada (mm)	
		P (mm)	T (años)	P (mm)	T (años)
Cabecera	Pl.A.El Gallego	138.9	102	137.2	95
Zona Alta 1	PL.Venta Olivo	139.0	158	147.1	212
	PL.Las Caras	171.6	270	192.8	524
	Pl.Almadenes	159.6	293	180.3	587
	Pl.E.Cárcabo	162.6	289	183.7	577
	Pl.Cieza	152.0	161	171.8	311
	Pl.E.Moro	159.8	175	180.6	336
Zona Alta 2	Pl.E.Mayés	171.3	181	193.3	349
	Pl.Ojós	155.6	138	175.4	257
Zona Media	Pl.Cab.C.Crevillente	224.5	1,204	250.9	2,455
	Pl.E.Santomera	252.2	988	250.4	946
	Pl.Beniel	227.6	1,028	153.9	118
	Pl.Reguerón	191.2	272	213.3	501
	Pl.Contraparada	176.7	197	194.8	333
	Pl. Relojero-Ametse	179.0	211	198.3	368
Zona Baja	Pl. Orihuela	461.2	197,871	391.2	48,448
	Pl.Jacarilla	313.8	10,173	239.8	1,610
	Pl.E.La Pedrera	267.6	2,902	206.6	577
	Pl.ETAP Torrealta	211.4	942	186.2	446
	Pl.Baños Fortuna	185.2	433	152.3	151
Ramb. Costeras	Pl.La Puebla	292.9	7,105	331.0	17,679
	Pl.Pozo Estrecho	235.0	993	265.6	2,152
	Pl.CPCCartagena	224.5	753	211.2	526
	Pl.Torre Pacheco	218.0	627	246.3	1,323
	Pl.San Javier	199.7	383	137.2	57

Tabla 7. Periodos de retorno estimados para las máximas precipitaciones en 24 horas

Mención aparte merece el dato registrado en Orihuela, con 462 mm recogidos en 24 horas. Este valor claramente no puede ser manejado por el modelo SQRT-ET max en la actualidad, ya que el modelo asigna un valor cercano a los 200,000 años de periodo de retorno, lo que está totalmente fuera de cualquier rango razonable, y que simplemente muestra la severa limitación del modelo para considerar eventos en los que se producen precipitaciones consecutivas concentradas en el tiempo.

Por contextualizar este valor, piénsese que la Precipitación Máxima Probable (PMP) que es un concepto de seguridad manejado para el ámbito de las presas, y que supone un límite máximo razonable, determinista, para el valor de la precipitación máxima en una zona, se acepta que pueda estar relacionado con un periodo de retorno de 100,000 años. En la zona de las Ramblas Costeras, puesto que la mayor parte de la precipitación tuvo lugar el 13 de septiembre, el impacto en términos de periodo de retorno es menos drástico.

Las Tablas 6 y 7 muestran únicamente 25 pluviómetros, pero la estimación del periodo asociado a la máxima precipitación acumulada en 24 horas consecutivas se ha realizado sobre los 126 pluviómetros del SAIH distribuidos sobre la cuenca. El resultado se muestra en la Figura 5, donde se dibujan las líneas de igual periodo de retorno para valores de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años o superiores.

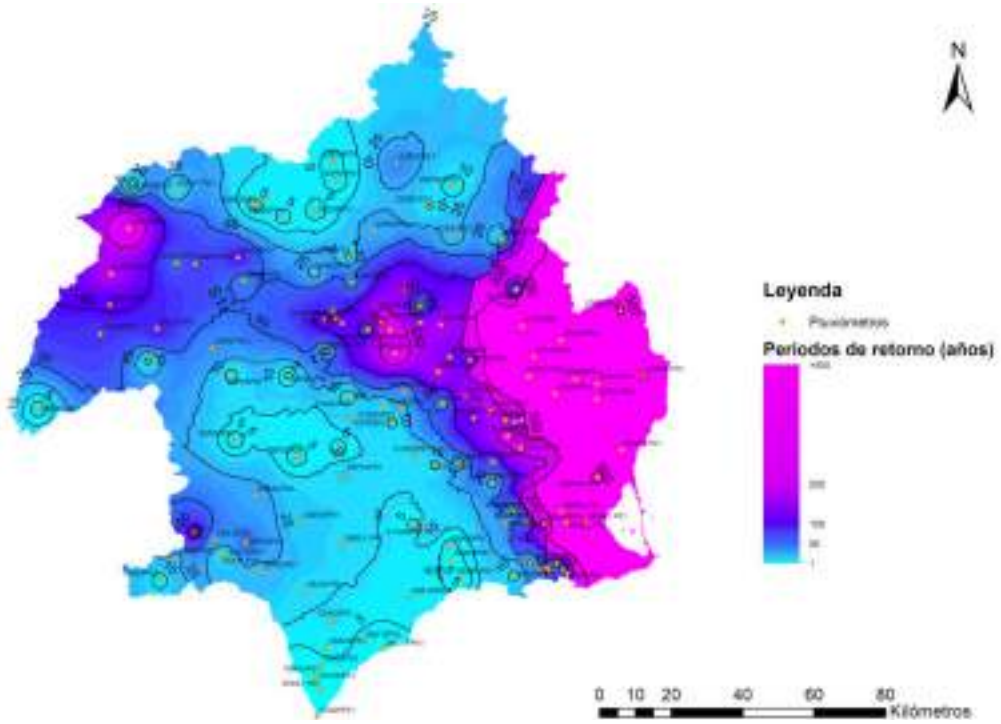


Figura 5. Mapa de periodos de retorno para precipitaciones máximas acumuladas en 24 horas consecutivas.

Como se observa en la Figura 5, la precipitación en toda la zona de la Vega Baja y las Ramblas Costeras tributarias del Mar Menor habría sido superior a 500 años de periodo de retorno, mientras que en las zonas norte y sur estaría por debajo de los 10-25 años.

3. ASPECTOS RELATIVOS A LA ESTIMACIÓN Y TRATAMIENTO DEL RIESGO ASOCIADO A INUNDACIONES

3.1. Formulación del riesgo asociado a inundaciones

El estándar que se ha adoptado mayoritariamente a nivel internacional como referencia para la gestión del riesgo es la ISO 31000 Gestión del Riesgo. Principios y Directrices, y en él se define el riesgo como “el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos”. Por objetivo se entiende “un resultado a alcanzar. Por “efecto” se entiende cualquier desviación (negativa o positiva) sobre lo esperado. Por “incertidumbre” se entiende un estado, aún parcial, de deficiencia de información relacionada a un evento en cuanto a:

- Comprensión del evento
- Conocimiento de sus consecuencias
- Conocimiento de su posibilidad

Desde este punto de vista, las inundaciones forman parte de la lista de fenómenos que provocan efectos adversos sobre los objetivos de las sociedades, como ha sido reflejado en múltiples estudios y análisis llevados a cabo (European Environmental Agency, 2016).

De acuerdo con la definición de riesgo, los objetivos pueden estar referidos a diversos ámbitos: seguridad y salud, económico y financiero, medioambiental, reputacional, bienestar social, etc. Es decir, habrá tantas dimensiones de riesgo como objetivos puedan verse afectados. Por tanto, un fenómeno como una inundación (o un terremoto) puede traer aparejado u ocasionar riesgo sobre la seguridad de las personas, riesgo sobre la salud pública, riesgo de tipo económico y financiero, riesgo medioambiental, riesgo reputacional, etc. Es decir, el riesgo es multidimensional y se define en función de los objetivos. Para medir el grado de consecución o desvío de cada objetivo es necesario en general disponer de indicadores, y a ser posible de unidades de medida. De este modo se puede tratar de cuantificar las consecuencias negativas (o positivas, en la formulación más general del riesgo) causadas por el evento.

Aceptando que una de las formas de expresar la incertidumbre es mediante la probabilidad, una expresión de un indicador de riesgo podría tener la forma general siguiente (Eq.1):

$$R = \int_{i,j,k,l} Pr(EV_i) \cdot Pr(RE_j|EV_i) \cdot Pr(EX_k|RE_j) \cdot Pr(C_l|EX_k, RE_j) \cdot C_l \qquad (1)$$

donde:

R: indicador de riesgo (típicamente en unidades de consecuencias/año)

Pr (EV_i): probabilidad (normalmente en unidades de año^{-1}) asociada un evento de precipitación de una determinada magnitud, EV_i, definida por una o varias características (volumen, intensidad, duración, etc.)

Pr ($RE_j \mid EV_i$): probabilidad (adimensional) asociada a una determinada respuesta del sistema, RE_j, frente al evento EV_i, expresada normalmente en forma de calados, velocidades, producto de calados por velocidades y duración de la inundación

Pr ($EX_k \mid RE_j$): probabilidad (adimensional) asociada a un determinado nivel de exposición de aquello que está amenazado, EX_k, dada una determinada respuesta del sistema, RE_j.

Pr ($C_l \mid EX_k$, RE_j): probabilidad (adimensional) asociada a un determinado nivel de consecuencias, C_l, dado un cierto nivel de exposición y considerando la respuesta del sistema

C_l: consecuencias, expresadas en las unidades correspondientes a la dimensión del riesgo considerada (por ejemplo, unidades monetarias o pérdida de vidas).

Como se desprende de la Eq.1, se puede llegar a un mismo nivel de riesgo mediante múltiples combinaciones diferentes de los factores que lo determinan.

Mediante la Eq.1 se puede evaluar el nivel de riesgo existente en un ámbito espacial, para una situación dada del sistema. Idealmente, se trataría de evaluar este nivel de riesgo y compararlo contra un valor de referencia, R*, que permitiera discriminar si hay que actuar para tratar el riesgo o no. El propósito del tratamiento del riesgo es seleccionar e implementar opciones para abordar el riesgo. De acuerdo con ISO 31000 el tratamiento del riesgo implica, en general, un proceso iterativo que incluye: (1) formular opciones de tratamiento; (2) planificar e implementar el tratamiento; (3) evaluar la eficacia del tratamiento, determinando el valor del riesgo residual, R_{res}; (4) decidir si el riesgo residual es aceptable ($R_{res} < R^*$); y (5) si no es aceptable, efectuar tratamiento adicional.

Las opciones de tratamiento del riesgo pueden incluir una o varias de las siguientes:

- Evitar el riesgo, no iniciando o no continuando con la actividad que genera el riesgo (por ejemplo, demoliendo viviendas situadas en zona inundable y no realizando nuevas actividades en estas zonas);
- Aceptar o aumentar el riesgo en busca de una oportunidad (por ejemplo, fomentando desarrollos urbanísticos que mejoran drásticamente objetivos económicos o de empleo, a

pesar de que puedan incrementar el riesgo de inundación);
- Eliminar la fuente de riesgo (por ejemplo, desviando el río fuera de la zona urbana, como en el caso de la ciudad de Valencia);
- Modificar la probabilidad (por ejemplo, mediante obras de defensa);
- Modificar las consecuencias (por ejemplo, mediante sistemas de alerta temprana que permitan la preparación de la emergencia, la eventual evacuación de la población y la adopción de medidas de emergencia para la protección de bienes, como barreras temporales);
- Compartir el riesgo (por ejemplo, a través de seguros);
- Retener el riesgo con base en una decisión informada.

3.2. Sobre la probabilidad de los eventos

Una buena estimación del riesgo, R (Eq.1), comienza por una estimación razonable de la probabilidad asociada a un determinado evento de precipitación, Pr (Ev_i).

El empleo de tormentas de diseño asociadas a un determinado periodo de retorno ha sido un instrumento extremadamente útil que ha permitido construir y operar infinidad de infraestructuras de todo tipo en nuestro país. En cambio, cuando se trata de gestionar el riesgo de grandes extensiones del territorio en un contexto de cambio climático, estas herramientas resultan insuficientes.

La estimación de la probabilidad asociada a la precipitación de septiembre de 2019 mediante la metodología habitualmente utilizada para lluvias diarias (Ministerio de Fomento, 1999) lleva a resultados claramente insatisfactorios y poco prácticos. Ello es debido a que el método está enfocado al dimensionamiento de obras de drenaje en cuencas pequeñas, y no al análisis de eventos complejos, con altos periodos de retorno, y para grandes extensiones, como queda puesto de manifiesto en la propia publicación, en la que se indica que el objetivo es: *"(...) presentar un método operativo que, de una manera breve y fiable, nos proporcione un valor de las Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular que sirva de base de partida para el cálculo de los caudales a desaguar por los pequeños cauces existentes en las obras de carreteras, supliendo así la ausencia de aforos en los mismos."*

El análisis de las curvas intensidad-duración-frecuencia procedentes del evento de septiembre de 2019 muestra que las intensidades a escala sub-diaria presentan periodos de retorno inferiores a los correspondientes a la escala diaria (Fig.6). Por ejemplo, para Orihuela, las intensidades de precipitación para 2-18 horas corresponderían a periodos de retorno de 1,000 a 5,000 años. En cambio, la precipitación máxima diaria correspondería 200,000 años de periodo de retorno. Algo similar ocurre para el pluviómetro de Jacarilla, que muestra intensidades asociadas a periodos de retorno de entre 200 a 500 años para duraciones de hasta 18 horas y de más de 10,000 años para 24 horas.

Por tanto, la puesta al día del método incluyendo los valores registrados en los últimos 20 años, siendo necesaria, debería realizarse con gran cuidado. Sería cuestionable actualizar las medias de las series de máximas precipitaciones diarias anuales con los registros recientes y luego utilizar los valores de la precipitación diaria para diversos periodos de retorno proporcionados por el método actualizado para generar hietogramas sintéticos de evento único con los que actualizar y proyectar infraestructuras. Las intensidades de pico resultantes de estos hidrogramas estarían probablemente fuera de los rangos observados y, por utilizar un símil deportivo, una actualización indiscriminada supondría mover una línea que dejaría en fuera de juego a prácticamente todas las obras y estudios realizados basados en la publicación de 1999.

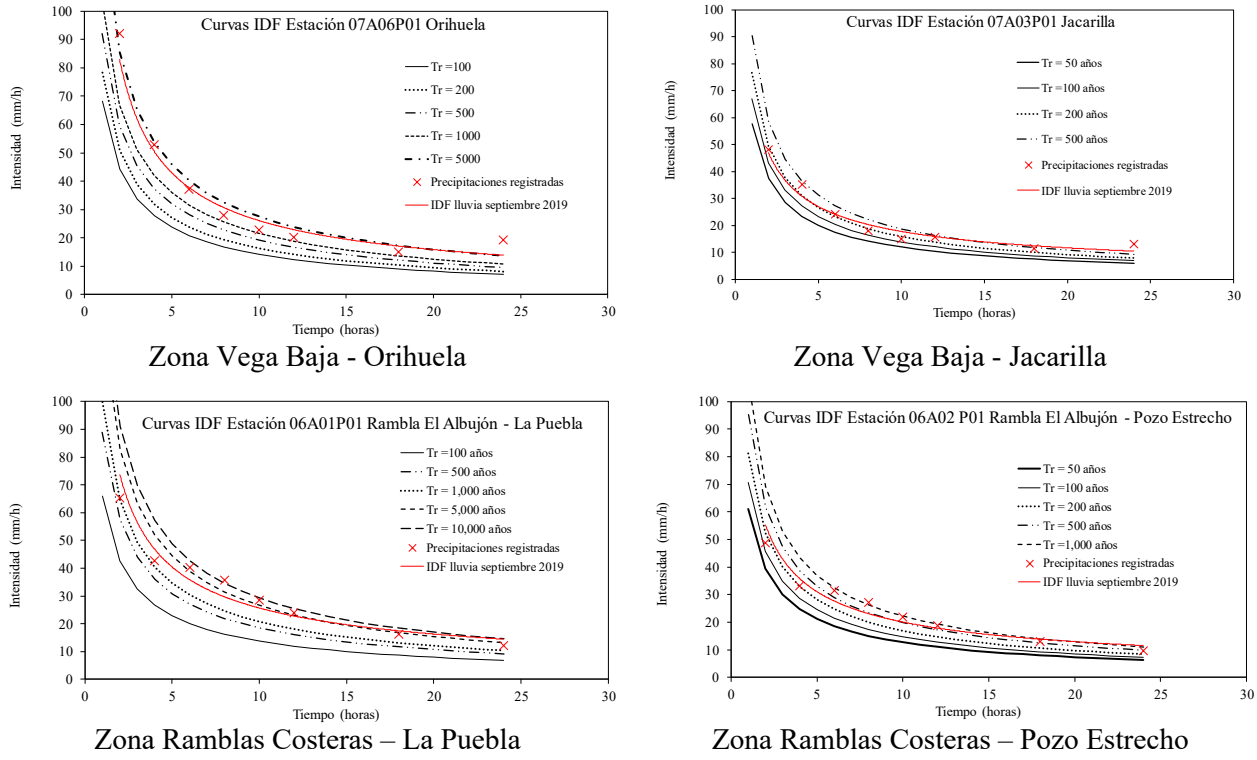


Figura 6. Curvas IDF ajustadas para el evento de septiembre de 2019 y su comparación con las curvas esperadas para diversos periodos de retorno.

En zonas donde se producen episodios de precipitación de 2-3 días, y para el análisis de otro tipo de problemas diferentes a los asociados a pequeños cauces y sus obras de drenaje, es preciso reconsiderar el empleo de la tormenta de diseño asociada a un cierto periodo de retorno y emplear técnicas alternativas, como los generadores meteorológicos estocásticos, para estimar la probabilidad asociada a diversos eventos (Beneyto Ibáñez et al., 2019).

El reto al que se enfrenta la estimación de la probabilidad ya sea utilizando modelos estadísticos clásicos o mediante generadores meteorológicos, es que en cualquier caso los modelos han de ser alimentados con registros de precipitaciones observadas. Cuando estas observaciones proceden de un sistema físico que se mantiene estable durante el periodo de observación, la precisión de las predicciones va a mejorar conforme aumenta el número de observaciones, y en consecuencia la incertidumbre va a disminuir. En cambio, cuando las observaciones proceden de un sistema físico inestable, cambiante, en el que aumento progresivo de la temperatura del aire en los próximos años puede aumentar la cantidad de vapor de agua disponible en la atmósfera y aumentar la torrencialidad, la incertidumbre asociada a las estimaciones parece que tenderá a aumentar.

Como alternativa a las extrapolaciones a largo plazo basadas en registros pasados de precipitación, se utilizan pronósticos de precipitación generados con modelos climáticos. Es previsible que estos pronósticos mejoren en los próximos años conforme crezca el número de observaciones. En todo caso, parece intuirse que el grado de incertidumbre asociado a las estimaciones de probabilidad asociadas a las precipitaciones extremas seguirá siendo muy elevado.

3.3. Sobre la probabilidad de la respuesta

Para estimar el riesgo es necesario decir algo sobre la probabilidad asociada a una determinada respuesta del sistema frente a los eventos, $Pr(RE_j \mid EV_i)$ expresada normalmente en forma de calados, velocidades, producto de calados por velocidades y duración de la inundación. En la respuesta del territorio ante un evento de precipitación intervienen muchos factores. Se realiza a continuación algunos comentarios sobre 3 de ellos: factores hidrológicos, factores hidráulicos, y factores relacionados con la gestión de infraestructuras.

3.3.1. Factores hidrológicos

Un aspecto esencial es la estimación de la fracción de la lluvia total que va a producir escorrentía. Uno de los métodos más habituales empleados para modelar este proceso es el método del número de curva, CN, del Soil Conservation Service (US Department of Agriculture, 1954). No obstante, este método presenta problemas a la hora de considerar el estado de humedad antecedente del suelo. La forma habitual de resolver la cuestión es utilizar un número de curva modificado con respecto al número de curva de referencia, que correspondería a condiciones de humedad medias, denominado CN(II). Así, partiendo de este CN(II), se definen números de curva corregidos para condiciones iniciales secas, CN(I), y para condiciones iniciales de humedad alta, CN(III). No obstante, esta aproximación parece conceptualmente incorrecta, ya que el número de curva debería ser una propiedad intrínseca del suelo y no depender de las condiciones de humedad iniciales. Además, los resultados de precipitación neta varían muy significativamente en función de que se utilice el CN para condiciones I, II o III.

La modificación al método que se ha propuesto (Michel at al., 2005) es una buena forma de evitar este inconveniente, reduciendo mucho la variabilidad del volumen total final de lluvia neta. En la Tabla 8 se recoge un ejercicio en el que se ha estimado cual sería la precipitación neta en Orihuela partiendo del registro de los días 11, 12 y 13 de septiembre de 2009, aplicando el método del número de curva, suponiendo un valor, a efectos de prueba simplemente, de CN = CN(II) = 60. Se ha obtenido la lluvia neta utilizando la formulación clásica para los tres casos de humedad antecedente I, II y III.

También se ha estimado la lluvia neta utilizando la formulación modificada, en 3 hipótesis de humedad antecedente: seco, medio y húmedo. El modelo modificado se ha ajustado para que la hipótesis de contenido de humedad de partida sea igual a la del modelo clásico (casos II y III) o lo más parecida que la formulación permite (caso I).

Como se observa, para una precipitación acumulada de 521.6 mm en 3 días, el método convencional ofrece un abanico de valores de precipitación neta de 230 mm (I), 362 mm (II) y hasta 443 mm (III), mientras que el método modificado proporciona un rango más reducido, de 341 mm (I), 362 (II) y hasta 380 mm (III).

En todo caso, por su relevancia sobre la estimación de la lluvia neta, la humedad antecedente previa es este tipo de episodios es un factor que podría incorporarse de forma probabilística en la Eq.1.

Pluviómetro Orihuela				
	Tiempo desde 11-sep 8:00h	24 h	48 h	72 h
	P bruta acumulada (mm)	35.0	381.2	521.6
Método CN CN = CN(II) = 60	P neta acumulada I (mm) con Ia = 81 mm	0.0	128.42	230.4
	P neta acumulada II (mm) con Ia = 34 mm	0.0	233.5	362.0
	P neta acumulada III (mm) con Ia = 15 mm	4.5	305.9	443.4
Método Modificado CN = 60	P neta acumulada I (mm) con Vo = 0 mm; Ia = 56 mm	0.0	213.5	341.0
	P neta acumulada II (mm) con Vo = 22 mm, Ia = 34 mm	0.0	233.4	361.9
	P neta acumulada III (mm) con Vo = 41 mm, Ia = 15 mm	2.1	250.4	379.7
Ia (mm): Abstracción inicial; Vo (mm): contenido de humedad inicial				

Tabla 8. Ejemplo de cálculo de la precipitación neta.

3.3.2. Factores hidráulicos

Aunque normalmente se trata de forma determinística, la estimación de la respuesta hidráulica en términos de calados y velocidades también está sujeta incertidumbre. La respuesta hidráulica obtenida está condicionada por la calidad de la información topográfica, por la determinación del coeficiente fricción en cada punto del dominio de flujo, por la presencia de infraestructuras de regulación y por el tipo de modelo utilizado y su adecuación al caso de estudio (modelos hidráulicos 1D, 2D o modelos híbridos 1D-2D). Normalmente los modelos hidráulicos que simulan el estado actual pueden ser calibrados y el impacto de la incertidumbre sobre el riesgo R es relativamente pequeño. En cambio, al proyectar actuaciones que influyen sobre la respuesta hidráulica futura, ya sean de tipo estructural (presas, encauzamientos, diques, motas, etc.), o encuadradas dentro de las denominadas Soluciones Basadas en la Naturaleza, los resultados de la modelación hidráulica solo podrán verificarse una vez construidas.

Un problema de la modelación hidráulica, en particular la 2D, son los elevados tiempos de cálculo, sobre todo si se trabaja con tamaños de malla reducidos en dominios de gran extensión. Cuando se trata de evaluar diferentes opciones de tratamiento del riesgo resulta de interés poder modelar muchas opciones diferentes para tratar de obtener el riesgo residual R_{res}, estimando así la reducción de riesgo obtenida ($\Delta R = R - R_{res}$) y pudiendo obtener indicadores de eficiencia de las distintas alternativas, en términos de reducción de riesgo conseguida dividida por el coste de la alternativa. En el ámbito de la gestión del riesgo resulta de interés explorar estrategias de modelación hidráulica con modelos híbridos 1D-2D, que sacrifiquen precisión a cambio de rapidez de cálculo, de modo que puedan integrarse con éxito en el proceso de tratamiento del riesgo descrito.

Un elemento que puede ser especialmente relevante en algunos casos es la consideración de la precipitación in situ en los modelos hidráulicos. La distribución de precipitación observada en el evento de septiembre de 2019 demuestra que la mayor parte se produjo aguas abajo de las infraestructuras de regulación, en la parte media y baja de la cuenca, que presenta pendientes muy reducidas y una lenta velocidad de vaciado. Por tanto, en estos casos los modelos hidráulicos deben ser capaces de modelar la precipitación in situ, variada espacial y temporalmente.

3.3.3. Factores relacionados con la gestión de infraestructuras y actuaciones

Para promover la adaptación a un futuro dominado por la incertidumbre se propone el empleo de las denominadas Soluciones Basadas en la Naturaleza o SBN (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018), que se han incorporado al abanico de soluciones disponibles. Las obras de defensa clásicas (presas, encauzamientos, interceptores, diques, motas, etc.) han demostrado ser eficaces en el tratamiento del riesgo de inundación, pero un aumento de la probabilidad y magnitud de los eventos extremos supondría una reducción en la capacidad de protección que proporcionan. Las SBN, por su parte, permiten un tratamiento más equilibrado, al atender a múltiples objetivos, incluyendo calidad del agua, mantenimiento de ecosistemas, eficiencia energética, etc. Parece pues que la solución óptima a problemas de inundación complejos debería pasar por encontrar, en cada caso, el mix idóneo formado por soluciones de defensa más potentes combinadas con SBN, sin renunciar a ninguna de ellas.

La respuesta de un sistema en el que hay infraestructuras se suele modelar de forma determinística. Sin embargo, en aquellos casos en los que la infraestructura puede ser operada por disponer compuertas o elementos móviles, es preciso considerar la incertidumbre en la operación. Además, en cualquier caso, es posible que se produzca un fallo parcial o total de la infraestructura con consecuencias sobre la inundación (desde fallo de motas y muros de encauzamientos a rotura de presas). Existen metodologías pioneras que permiten incorporar estos aspectos a la gestión del riesgo de inundación (Comité Nacional Español de Grandes Presas, 2012).

Se quiere hacer una consideración sobre la importancia de la atención al mantenimiento y conservación de presas. Además de muchas otras funciones, los embalses y las presas permiten laminar las crecidas de los ríos, actuando sobre el término de probabilidad de la respuesta. En este sentido, el caso del papel desempeñado por la presa de Santomera en la protección de los núcleos urbanos de Santomera, Beniel y Orihuela durante el evento de septiembre de 2019 es paradigmático. Sin embargo, como ocurre con otras infraestructuras, se viene produciendo desde hace años una pérdida de capacidad inversora en el mantenimiento y conservación de presas, que resulta llamativa a la vista de la importancia de su seguridad. Por poner en contexto la importancia de la seguridad, piénsese que la altura promedio de las aproximadamente 1,200 presas que hay es de 33 m y el volumen promedio de unos 50 hm^3. Suponiendo que el centro de masas del embalse se sitúe a un 75 % de la altura y suponiendo una densidad de 1,000 kg/m^3 para el agua embalsada (es decir, prescindiendo de los sedimentos), la energía potencial aproximada de la masa de agua para 1 embalse "tipo" es de unos 12 terajulios (12 TJ). Este valor se puede comparar, por ejemplo, con la energía liberada por la bomba de Hiroshima, que fue de 63 TJ. En caso de rotura, esta energía se va a liberar en poco tiempo, a lo sumo unas pocas horas. Parecería conveniente por tanto destinar a estas infraestructuras, muchas de las cuales están llegando al final de su etapa de madurez, la atención y los recursos que se merecen.

3.4. Sobre la probabilidad de exposición

La probabilidad asociada a un determinado nivel de exposición de aquello que está amenazado dada una determinada respuesta del sistema, $Pr\,(EX_k \mid RE_j)$, depende de la naturaleza de la consecuencia analizada y de la capacidad de movilidad y traslado o protección in situ del bien amenazado: personas, seres vivos, edificios, infraestructuras e instalaciones y bienes contenidos en edificios y construcciones, u otro tipo de valores. El desarrollo de sistemas de alerta temprana, junto con procedimientos reglados de preparación para la emergencia y la presencia sobre el terreno de recursos humanos y materiales suficientes permiten reducir el nivel de exposición, y su impacto en términos de reducción de riesgo y beneficio-coste podrían ser determinados mediante el uso de la Eq. 1. De igual modo, la comunicación instantánea a las personas (en España hay 47 millones de habitantes y más de 54 millones de líneas de móviles) ha permitido reducir mucho el número de personas expuestas en caso de inundaciones recientes.

3.5. Sobre la probabilidad de las consecuencias

La probabilidad asociada a un determinado nivel de consecuencias, C_l, dado un cierto nivel de exposición y considerando la respuesta del sistema, $Pr\,(C_l \mid EX_k, RE_j)$, sería el último término que es preciso evaluar en la ecuación del riesgo. Este es el campo de aplicación de las típicas curvas calado-daño, velocidad-daño, etc. Se suele tratan de una forma determinista más que probabilista, y es un campo en constante perfeccionamiento (Martínez-Gomariz et al., 2019).

4. CONCLUSIONES

El fenómeno DANA de septiembre de 2019 ha sido uno de los más potentes registrados en esta zona del Levante español, produciendo volúmenes de precipitación muy importantes que, según las zonas, se repartieron entre 1 y 3 días. Abordar un análisis de la frecuencia asociada a las precipitaciones registradas con las herramientas utilizadas habitualmente para el análisis de máximas precipitaciones diarias anuales arroja unos resultados que muestran que es necesario contar con enfoques alternativos. Partiendo del evento de septiembre de 2019 y en el marco de la estimación y tratamiento del riesgo de inundación, se ha puesto de relieve diversos aspectos.

A la vista de la variabilidad presente en la estimación del riesgo, parece conveniente aproximarse al problema desde la incertidumbre, reconociendo que la probabilidad es una herramienta útil para manejar y comunicar la incertidumbre, y reconociendo también que la dinámica del cambio climático, junto con la gran cantidad de variables aleatorias que intervienen en el problema dificultan el establecer probabilidades y, por tanto, niveles de riesgo, con un mínimo nivel de certeza.

Es necesario perseverar en la mejora de las herramientas y métodos relacionados con generadores meteorológicos, técnicas de estimación de la lluvia neta y consideración de la precipitación in situ en los modelos hidráulicos. En cuanto a las medidas de tratamiento, es necesario contar con todas las opciones medioambientales, técnicas y tecnológicas disponibles para tratar el riesgo, utilizando cada una de ellas de la mejor forma posible, reconociendo sus fortalezas y debilidades. En particular, el mantenimiento y conservación de presas debería ser una prioridad. Además, si se incluyen adecuadamente en la estimación del riesgo, es posible cuantificar la contribución al tratamiento del riesgo de los sistemas de alerta, preparación y gestión de la emergencia.

REFERENCIAS

- Beneyto Ibáñez, C., Aranda Domingo, J.A., Benito Ferrández, G. & Francés García, F. (2019). Metodología basada en generadores meteorológicos para la estimación de avenidas extremas. *VI Jornadas de Ingeniería del Agua*. Toledo, España.
- Castejón, G. y Romero, A. (2014). Inundaciones en la Región de Murcia en los inicios del siglo XXI. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 19 (1102).
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. (2012). *Guía Técnica de Explotación de Presas y Embalses. Tomo 1: Análisis de riesgos aplicado a la gestión de presas y embalses*. Comité Nacional Español de Grandes Presas, Madrid.
- Espín Sánchez, D., García Lorenzo, R., Ruiz Álvarez, V. y Conesa García, C. (2017). The heavy rains and floods on 17 and 18 December 2016 in the Region of Murcia, with particular focus on the Mar Menor Watershed. *Ingeniería del agua*, 21(4), 213-229.
- European Environmental Agency (2016). *Flood risk in Europe: the long-term Outlook*. Copenhague, Dinamarca.
- Ferreras, C. (2004). Inundaciones y sequías en la cuenca del río Segura. *Serie Técnica y Estudios*, 27, 55. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, Murcia.
- Martín León, F. (2019). Dana de septiembre: de trenes a sistemas convectivos de mesoescala.

https://www.tiempo.com/ram/dana-de-septiembre-de-trenes-a-sistemas-convectivos-de-mesoescala.html.

- Martínez-Gomáriz, E., Guerrero-Hidalga, M., Russo, B., Yubero, D., Gómez, M. y Castán, S. (2019) Desarrollo y aplicación de curvas de daño y estanqueidad para la estimación del impacto económico de las inundaciones en zonas urbanas españolas. *VI Jornadas de Ingeniería del Agua*. Toledo, España.
- Maurandi, A. y Romero, A. (2000). Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo XX. *Serie Geográfica*, 9, 93-120.
- Michel, C., Andréassian, V. y Perrin, C. (2005). Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure?. *Water Resources Research*, 41.
- Ministerio de Fomento. (1999). *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Ministerio para la Transición Ecológica. (2018). *Inundaciones y cambio climático*. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- U.S. Department of Agriculture. (1954). *National Engineering Handbook, sect. 4, Hydrology*. U.S. Govt. Print. Office, Washington, D. C.
- World Meteorological Organization, WMO. (2009). *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*, 1045. WMO, Ginebra.

IMPLANTACIÓN DEL SERVICIO SMART RIVER BASINS EN LA VEGA BAJA DEL SEGURA

Álvaro Rodríguez García
Suez, España
alv.rodriguez@suez.com
https://orcid.org/0000-0002-5743-6425

Ramón Bella Piñeiro
Aquatec, España
rbella@aquatec.es
https://orcid.org/0000-0001-9294-4751

Xavier Llort
Hyds, España
xavi.llort@hyds.es
https://orcid.org/0000-0001-8736-7814

Simón José Pulido Leboeuf
Suez, España
simon.pulido@suez.com
https://orcid.org/0000-0003-1003-2586

Manuel Argamasilla Ruiz
CETaqua Andalucía, España
manuel.argamasilla@cetaqua.com
https://orcid.org/ 0000-0001-7396-946X

RESUMEN

Los últimos episodios de eventos hídricos extremos (sequías e inundaciones) acaecidos en la parte sur de la provincia de Alicante han puesto de manifiesto la necesidad de incrementar la resiliencia de los territorios ante los efectos del cambio climático, y proporcionar a los gestores de herramientas que permitan incrementar la capacidad de mitigación de dichos eventos. Se presenta la implantación de la plataforma Smart River Basins en la Vega Baja del Segura que, mediante la caracterización de la zona de estudio y el análisis de la información en tiempo real, a través de procesos de modelación es capaz de dotar de un sistema de alerta y gestión municipal de emergencias para la mitigación de los daños producidos por las inundaciones, dotando de mayor capacidad de preparación de las acciones a realizar en estos eventos a las entidades locales. Por otra parte, el sistema, apoyado en los planes especiales de sequía, realiza un seguimiento de los eventos de sequía y escasez, que permite mejorar la gestión de estos periodos, incorporando también capacidad de anticipación a dichos eventos, permitiendo así mejorar la resiliencia de las poblaciones.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de las inundaciones naturales es uno de los que mayor impacto socioeconómico tiene en España, agravado en intensidad y frecuencia por el efecto del cambio climático y la ocupación del espacio fluvial.

Tanto la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo como los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) de las Confederaciones Hidrográficas plantean los sistemas de alerta temprana frente a inundaciones como una de las medidas no estructurales prioritarias. Concretamente, la medida 15.01.01 de los programas de medidas de los PGRI está dedicada a este objetivo.

En los últimos años la vertiente mediterránea española se ha visto afectada por diferentes eventos hídricos extremos, con periodos de escasez muy pronunciada, así como con eventos de inundaciones de gran magnitud. Especialmente significativo fue el episodio de inundaciones de la Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) del 11 al 17 de septiembre de 2019, que castigó de manera extraordinaria a la comarca de la Vega Baja del Segura, situada en la parte suroccidental de la provincia de Alicante.

Del mismo modo, como una de las principales consecuencias del cambio climático, es de esperar que estos episodios hídricos extremos se repitan con mayor frecuencia e intensidad, con lluvias torrenciales que podrían provocar más a menudo inundaciones más severas y con periodos de sequía y escasez cada vez más largos e intensos (Trenberth et al., 2014).

Con el fin de contribuir a reforzar la resiliencia de esta zona ante episodios de este tipo, actualmente se está implantando un servicio digital que aumentará la capacidad de gestión de la administración y la ciudadanía del territorio.

Para ello, a partir de la plataforma Smart River Basins®, Suez ha creado un servicio que realiza un seguimiento de los fenómenos extremos anteriormente comentados (periodos de sequía/escasez y episodios de inundaciones) que permite anticipar la gestión de los diferentes agentes implicados para obtener una minoración de los riesgos y los posibles daños ocasionados. Se trata, por tanto, de una herramienta esencial para incrementar la capacidad de respuesta de los sistemas de recursos hídricos frente a los impactos del cambio climático.

Los principales objetivos de la herramienta Smart River Basins son:

- Incorporar, de un modo dinámico, toda la información relevante para una óptima caracterización de cualquier sistema de explotación de recursos hídricos.
- Caracterizar de una manera precisa todas las componentes del ciclo hidrológico (oferta y demanda) así como las infraestructuras hidráulicas que las conectan.
- Evaluar las garantías de suministro en función de escenarios actuales y futuros de disponibilidad y demanda de agua.
- Impulsar y fomentar la transparencia y la participación activa en los procesos de planificación hidrológica.
- Generar servicios de alto valor añadido a partir del tratamiento y puesta en valor de todo tipo de bases de datos.

2. SMART RIVER BASINS

2.1. Descripción general. Objetivos de la iniciativa

Smart River Basins es una solución digital inteligente capaz de incorporar, de un modo dinámico, toda la información relevante para una óptima caracterización de cualquier sistema de explotación de recursos hídricos. Esta herramienta tiene como punto clave la transversalidad para la integración y análisis de diferentes fuentes de información que hasta ahora se trataban de forma separada, poniendo de manifiesto así las fuertes interrelaciones existentes.

La plataforma permite conectar entre sí todos los componentes que influyen en la gestión del recurso

hídrico, poniendo a disposición del gestor una visión única y aportando una gestión integrada que permite dotar a los gestores de un mayor control sobre los procesos y de una mejora en la toma de decisiones, fomentando la transparencia y efectividad de las actuaciones.

Con el fin de optimizar el análisis de esa información, la plataforma está diseñada para poder obtener y procesar información de cualquier elemento susceptible de proporcionarlos en el entorno de la gestión hídrica. Del mismo modo, el acceso a esta información se lleva a cabo mediante mecanismos que aseguran su confidencialidad e integridad.

Los procesos que tienen lugar, de forma general, en la plataforma son:

- Adquisición de datos. Mediante este proceso se lleva a cabo una conexión con toda la información existente que pueda tener relevancia en la gestión del recurso hídrico, ya sea mediante la conexión a fuentes de datos que proporcionan información en tiempo real (redes SAIH o SAICA, por ejemplo) o incorporando una capa con la información existente actualmente que rigen las normas de gestión, tales como planes hidrológicos, planes de sequía, planes de emergencia, estado concesional, etc. Al incorporar esta información y georreferenciarla, se obtiene un valor añadido intrínseco, ya que hasta ahora no era posible poder consultar toda esta información desde un único punto de acceso. Del mismo modo, es posible incorporar toda la información propia del gestor y que se estime necesaria para disponer de una mejor caracterización del sistema hídrico.
- Procesamiento e incorporación. Dentro de este proceso se lleva a cabo el almacenamiento, tratamiento, interrelación y explotación de los datos para convertirlos en información básica, para posteriormente, cuando sea necesario, llevar a cabo con ella diferentes procesos de caracterización, modelización, inteligencia artificial, pronóstico y recomendación que permitan extraer resultados útiles para la posterior toma de decisiones.
- Proceso de interoperabilidad, que permite la interacción entre la plataforma y el gestor, permitiendo que los usuarios y otros sistemas de información consuman la información producida en el sistema de forma interactiva, con la GUI o mediante APIs de diversos tipos. De este modo, la plataforma no pretende erigirse como una herramienta aislada, capaz de hacer todo lo que otros sistemas ya están en disposición de hacer, sino que está concebida, además de para realizar todas las funcionalidades que se comentaran posteriormente, para actuar como un intérprete capaz de complementarse bajo las siguientes premisas: (i) preguntar a otros sistemas, enviándole un conjunto de datos a un modelo de simulación, por ejemplo, (ii) entender sus respuestas y mostrarlas al usuario en la interfaz gráfica y (iii) servir informes a otras plataformas de información de la administración y otras organizaciones colaboradoras.

Por lo tanto, con la utilización de este servicio se dispone de una solución única que engloba la totalidad de la información relevante de modo que, mediante la interacción entre el diagnóstico en tiempo real, el tratamiento de dicha información con la ya existente y la inclusión de resultados de diferentes modelos constituye una plataforma que permite:

- Mejorar la caracterización del sistema hidrológico/hidráulico, ya que se incluirán todos los factores que intervienen en el mismo.
- Crear alertas, a través de la propia información recopilada, o a través de los resultados de modelos de predicción.
- Optimizar el conjunto de medidas a seleccionar para obtener los objetivos marcados, considerando aspectos medioambientales, económicos y sociales.
- Dinamizar la participación de todas las partes interesadas, al disponer de una herramienta que recopila y analiza toda la información en un único punto.

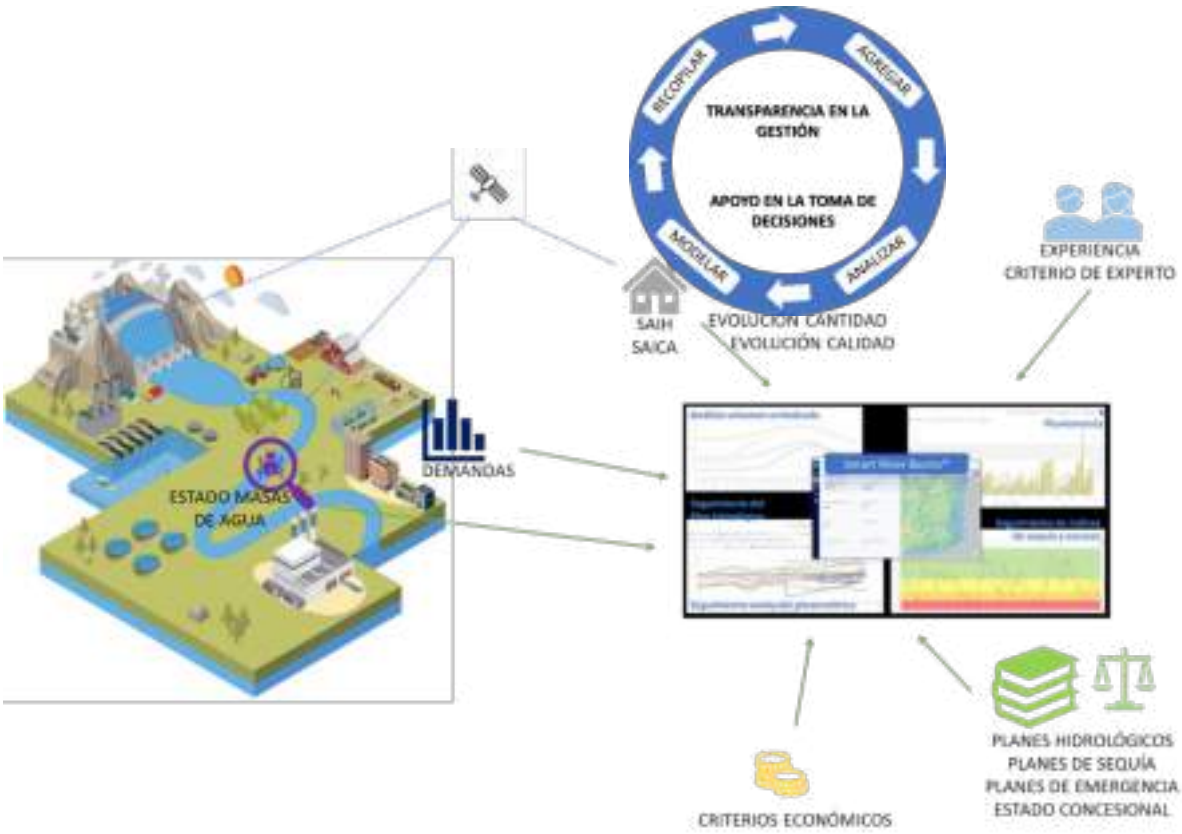


Figura 1. Esquema funcional de la plataforma Smart River Basins. Fuente: elaboración propia.

2.2. Módulo de hidrología

Hoy en día no es posible concebir una gestión y planificación de los recursos hídricos que no sea conjunta e integrada. Es decir, se necesita obtener una visión conjunta de las interrelaciones entre los distintos orígenes de recursos disponibles (convencionales o no) y su relación con las demandas en un determinado territorio.

El módulo de información hidrológica contiene la faceta más básica del sistema de información. En esencia, este módulo es el que se encarga de recopilar, agregar y analizar las distintas fuentes de datos hidrológicos y de convertirlas en un conjunto único de información que se puede analizar, comparar e interrelacionar.

Dichas fuentes de datos abarcan desde la información de las precipitaciones recogidas en los dispositivos de observación pluviométrica y nivométrica hasta la evolución de los niveles piezométricos y la calidad del agua subterránea, pasando por los volúmenes embalsados o los caudales y niveles del agua circulante por cauces y canalizaciones.

El desafío al que responde este módulo es el de lograr una visión de conjunto sin renunciar a la granularidad del detalle de la evolución de los parámetros de cantidad de recursos en activos concretos. Es decir, un usuario de la plataforma puede ver tanto el volumen total almacenado en una demarcación hidrográfica, o conjunto de ellas, como le evolución diaria del volumen almacenado en el menor de esos embalses, mediante las capacidades de *drill-down* de la plataforma, que hacen muy intuitiva la navegación de lo general a lo particular.

Es decir, es posible visualizar desde el total de recursos almacenados en una o más demarcaciones hidrográficas hasta el volumen de un embalse concreto, pasando por los sistemas y subsistemas de

explotación de una forma cómoda e intuitiva, percibiendo visualmente la proporción relativa entre los distintos elementos (ver Figura 2).

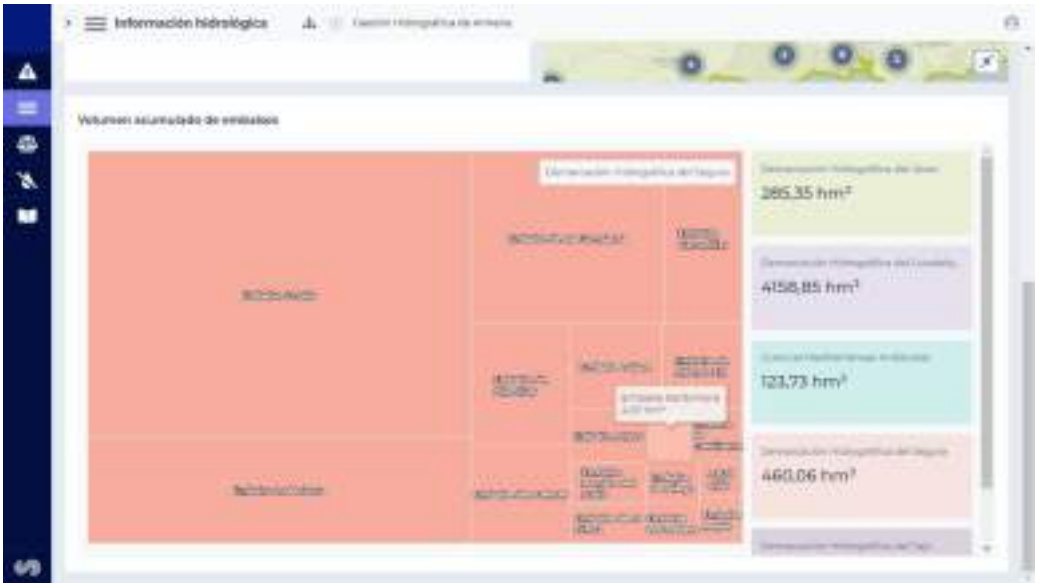


Figura 2. Vista jerarquizada de volúmenes almacenados en embalses.
Fuente: captura de pantalla de Smart River Basins.

Estas cantidades pueden también analizarse en relación con su evolución temporal, como la evolución de la precipitación diaria, acumulada anual y promedio. La

Figura 3 muestra el ejemplo de un pluviómetro de Torre Pacheco, en la provincia de Murcia, entre 2009 y 2020. Se observa cómo la distribución temporal de las precipitaciones conlleva una reducción de aportaciones y, al mismo tiempo, una concentración cada vez más acusada de dichas aportaciones en episodios lluviosos extremos.

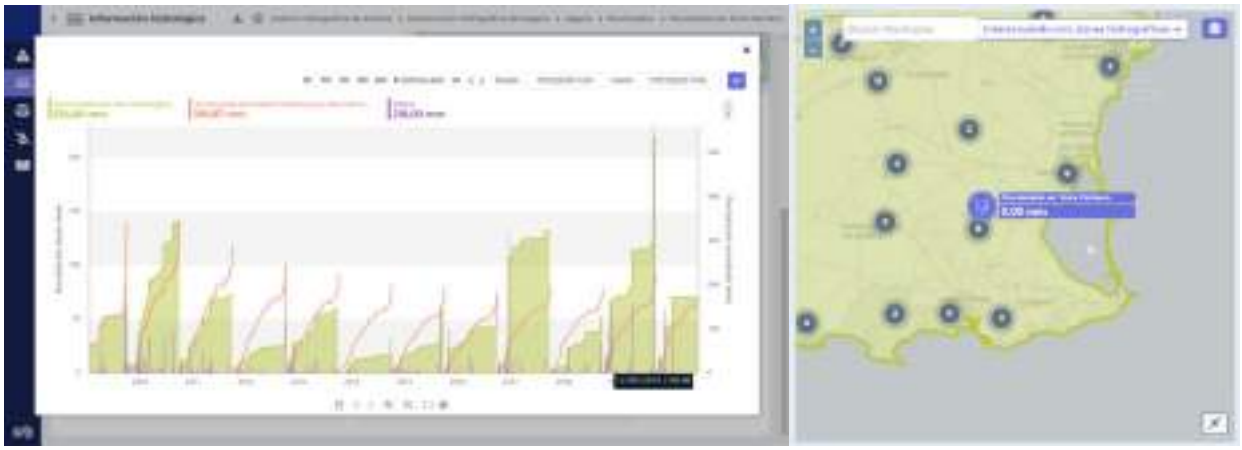


Figura 3. Evolución del acumulado anual, promedio histórico del acumulado anual y precipitación diaria en el pluviómetro de Torre Pacheco (Murcia). Fuente: Smart River Basins.

2.3. Módulo de sequía/escasez

La sequía es un fenómeno natural no predecible que viene originado principalmente por una falta de precipitación que provoca un descenso significativo en los recursos hídricos disponibles para la

satisfacción de las demandas (Hisdal *et al.,* 2001). Esta sequía es parte de la variabilidad climática normal, siendo uno de los descriptores del clima y de la hidrología que caracterizan a una zona determinada. Sus límites temporales, en la mayoría de las ocasiones, son imprecisos y resultan de difícil predicción, tanto en lo que respecta a su aparición como a su finalización.

En la revisión de los planes de sequía, aprobados recientemente en la mayoría de las demarcaciones hidrográficas españolas, se definen dos aspectos claramente diferenciados: por una parte, las situaciones de sequía prolongada, asociadas a la disminución de la precipitación y de los recursos hídricos en régimen natural y sus consecuencias sobre el medio natural, y, por otra parte, las de escasez coyuntural, asociadas a problemas temporales de falta de recurso para la atención de las demandas de los diferentes usos del agua.

Estos planes especiales establecen sistemas de indicadores y escenarios, tanto de sequía prolongada como de escasez coyuntural, que marcan el estado en el que se encuentra cada una de las zonas.

La plataforma Smart River Basins incluye un seguimiento de la evolución de estos indicadores, tanto de sequía como de escasez, contribuyendo al cumplimiento de 4 de los 5 objetivos operativos marcados en los citados planes de sequía:

- Definir mecanismos para detectar lo antes posible, y valorar, las situaciones de sequía prolongada y escasez coyuntural.
- Fijar el escenario de sequía prolongada.
- Fijar escenarios para la determinación del agravamiento de las situaciones de escasez coyuntural.
- Aumentar la transparencia y fomentar la participación pública en el desarrollo de los planes.

A partir de la información disponible en los planes de sequía, y con la información hidrológica recopilada por Smart River Basins (estaciones pluviométricas, estaciones de aforo, volumen embalsado y piezometría básicamente), es posible reproducir los indicadores de sequía y escasez. Además, actualmente dentro de la plataforma se están desarrollando modelos predictivos de estos indicadores de sequía y escasez. Dichos modelos se basan en la utilización de las series históricas de dichos indicadores (1980 – 2020), junto con "regresores estadísticos", como variables explicativas de su comportamiento (ej., la lluvia en diferentes puntos de la cuenca hidrográfica). Se están entrenando varios modelos diferentes para buscar el que mejor se adapte a las necesidades del área de estudio. Estos modelos requieren de la aplicación de técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*) y los últimos avances en el campo del aprendizaje profundo (*Deep Learning*), con el fin de encontrar patrones de comportamiento y tendencias lineales y no lineales, tan frecuentas en series hidro-meteorológicas.

El objetivo de estos modelos es predecir en el corto plazo (de 1 a 3 meses) cómo van a evolucionar los indicadores de sequía y escasez, y así tomar las medidas necesarias en función del estado en el que se encuentre el sistema o subsistema de explotación analizado. Dicho estado de escasez (Normalidad, Prealerta, Alerta o Emergencia), conlleva la aplicación de una serie de medidas, contempladas en los planes de sequía. De este modo, de un modo visual y rápido, el gestor y los propios usuarios son capaces de conocer en cada momento las medidas que deben aplicarse. Del mismo modo, y con el desarrollo de los modelos predictivos, al poder evaluar la evolución de los indicadores y poder asociar sus medidas, el gestor puede anticiparse a su implantación efectiva.

2.4. Módulo de alerta temprana frente a inundaciones

La plataforma Smart River Basins incorpora un sistema de alerta y gestión territorial y municipal de emergencias de origen hidrometeorológico con los objetivos de:

- Dotar de mayor capacidad de preparación con antelación de medios y acciones necesarias para hacer frente al riesgo ante un evento extremo hidrometeorológico.
- Lograr una mayor rapidez de aviso ante posibles eventos a las entidades públicas gestoras y a la ciudadanía en general.
- Gestionar mejor la emergencia y reducir los riesgos y daños materiales causados por eventos hidrometeorológicos extremos.

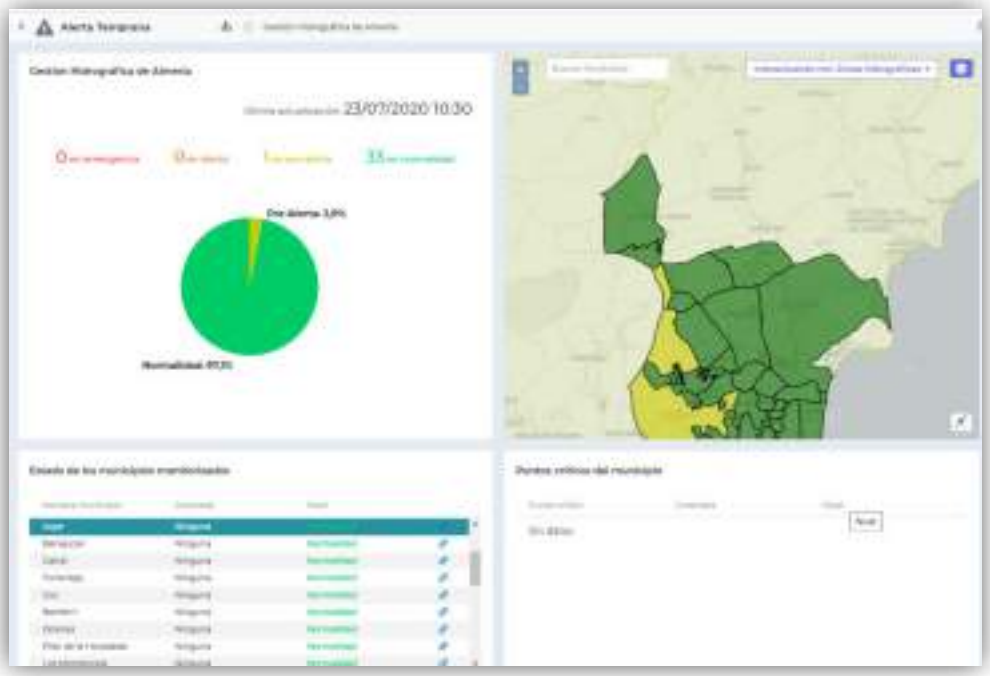


Figura 4. Cuadro de mando del Sistema de alerta de la Vega Baja. Fuente: elaboración propia con capturas de pantalla de Smart River Basins.

Para ello, se basa en los siguientes módulos o procesos:

- La adquisición en tiempo real de datos hidrometeorológicos y procesado de productos de alerta derivados.
- La incorporación de información de vulnerabilidad, incorporando datos de peligrosidad y riesgos del SNCZI.
- La generación de alertas tanto regiones (municipios, cuencas, etc.) como puntos críticos (edificios, infraestructuras, industrias, etc.), mediante el cruce dinámico de la información de las dos anteriores categorías.
- La diseminación de las alertas generadas.
- Seguimiento de la gestión de la emergencia.

2.5. Módulo de planificación hidrológica

El módulo de planificación hidrológica es un guía digital de la gran cantidad de información que contienen dichos instrumentos de planificación. Por medio de este módulo, el usuario puede consultar de forma geográfica, interactiva e intuitiva los distintos aspectos de la planificación y normativa en vigor en cada zona del territorio.

Por ejemplo, para cada una de las masas de agua de las demarcaciones hidrográficas del ámbito territorial analizado, es posible consultar la caracterización de las mismas, con los últimos valores vigentes de sus diferentes estados, así como del estado global de la misma.

Como ejemplo, se muestra la masa de agua subterránea de Vega media y Baja del Segura (071.036), en la
Figura 5:

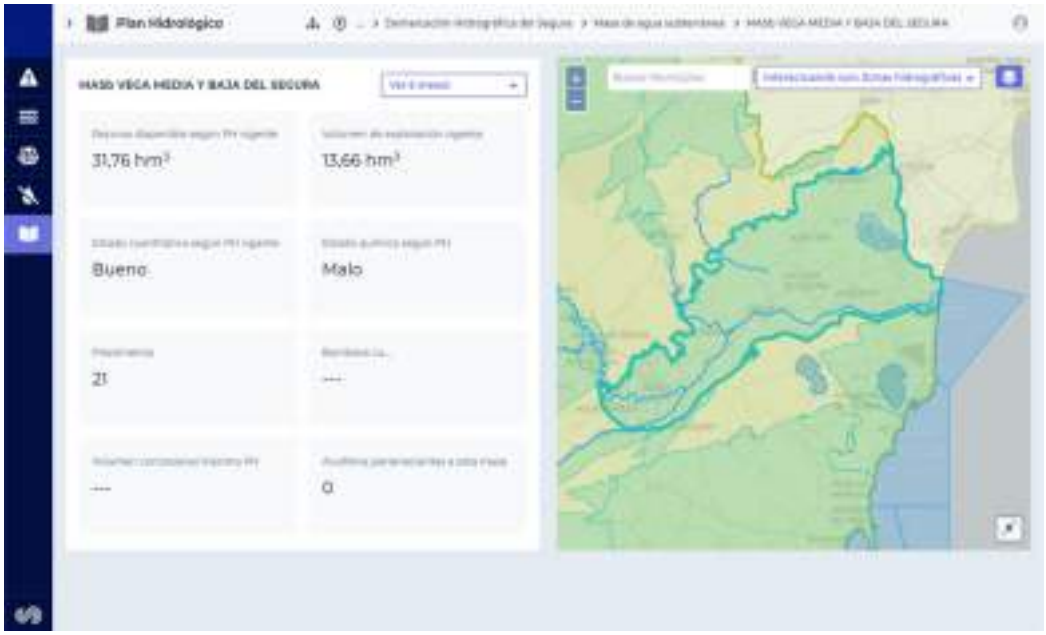


Figura 5. Captura de pantalla del estado ecológico de una masa de agua subterránea. Fuente: Smart River Basins.

Además, el sistema permite examinar con más detalle la información en la que se basa la evaluación de estado (
Figura 6), en la que se muestra la evolución de los niveles piezométricos en la red oficial de control de esta masa de agua.

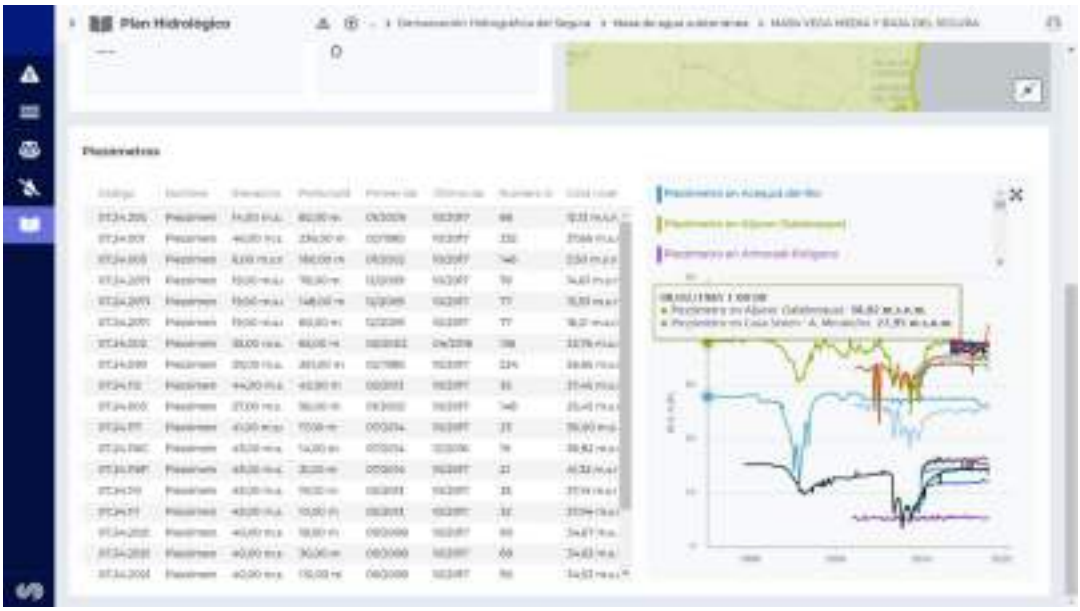


Figura 6. Información de los piezómetros de la masa de agua subterránea Vega Media y Baja del Segura (071.036). Fuente: Smart River Basins.

En definitiva, Smart River Basins ofrece una visión interactiva, intuitiva y sencilla de la información relevante que caracteriza los activos naturales y artificiales en relación con la gestión territorial del agua, apoyando la toma de decisiones y fomentando la transparencia y la participación pública en los objetivos de la adaptación al cambio climático y el desarrollo sostenible.

3. APLICACIÓN A LA VEGA BAJA DEL SEGURA

A continuación, se exponen los trabajos que se han llevado a cabo para la implantación de la plataforma Smart River Basins en la Vega Baja del Segura, y que pretende ser una ayuda para el aumento de la resiliencia de la zona ante fenómenos hídricos extremos, tanto sequías (en sus dos vertientes, de sequía prolongada y de escasez coyuntural) como en inundaciones, mediante un sistema de alerta temprana.

El ámbito de aplicación, como se ha comentado anteriormente, se corresponde con la comarca de la Vega Baja, incluyendo sus 27 municipios, tal y como se puede apreciar en la figura 7.

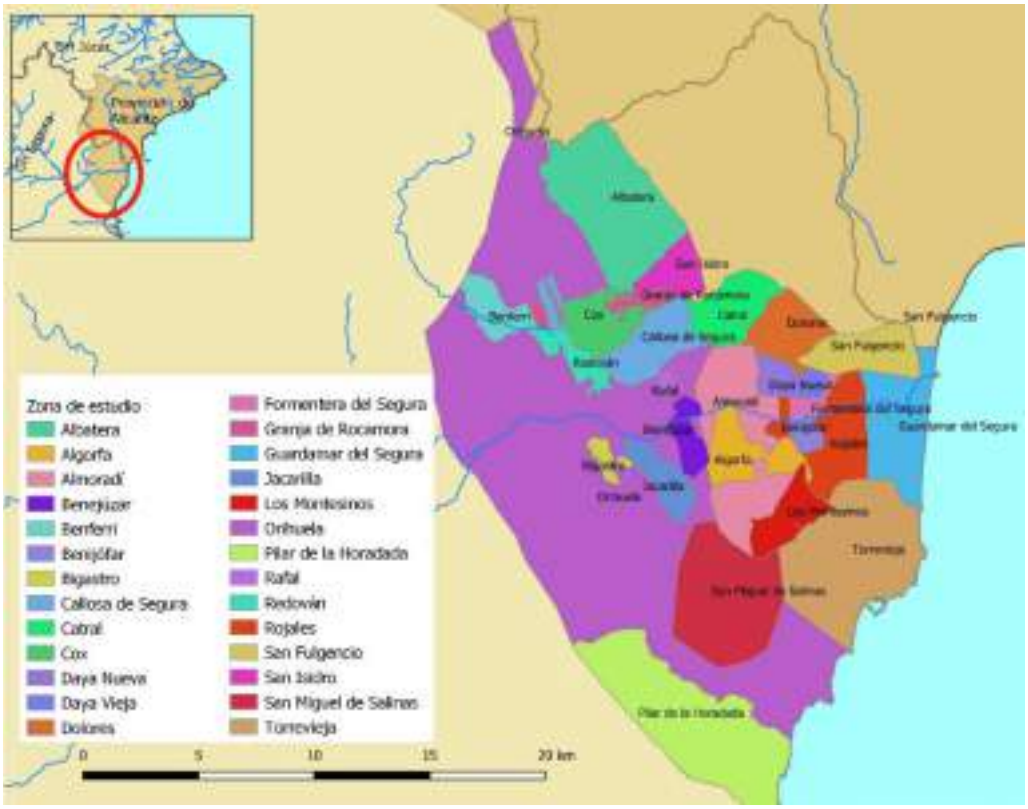


Figura 7. Ámbito de aplicación de la plataforma Smart River Basins en el proyecto de la Vega Baja del Segura. Fuente: elaboración propia a partir de la cartografía del IGN.

3.1. Antecedentes

Existen registros de inundaciones en la parte final del río Segura desde el año 1259 (Confederación Hidrográfica del Segura, 2020). Desde ese año se han registrado multitud de eventos que han producido daños de diversa consideración, especialmente a partir de las inmediaciones de la ciudad de Murcia (donde se unen los ríos Segura y Guadalentín) y hasta la desembocadura del propio río Segura, zona de implantación del piloto de Smart River Basins que es objeto de la presente ponencia. Especialmente importante fue la reciente inundación en la Vega Baja del Segura de septiembre de 2019, denominada como Riada de Santa María, y que fue una de las inundaciones más devastadoras y catastróficas que se han producido en España en los últimos años, con ocho muertos y numerosos

daños materiales. Esta DANA dio lugar a precipitaciones torrenciales en muchas regiones de la vertiente mediterránea (520,8 mm acumulados en Orihuela, 396,4 mm en Jacarilla o 308,7 mm en la zona del Albujón). Las lluvias de este evento comenzaron el día 11 de septiembre y finalizaron el día 17 del mismo mes. Sin embargo, las máximas intensidades de las precipitaciones se registraron durante los días 12 y 13.

Debido a que las lluvias fueron persistentes y concentradas, se produjo el desbordamiento de ríos y ramblas, inundando calles, campos y núcleos urbanos. Entre las inundaciones históricas registradas, este evento de DANA destaca por su virulencia. Carreteras, colegios y los aeropuertos de Murcia y Alicante cerraron. En las estaciones meteorológicas de los aeropuertos de Almería y de Murcia se superaron máximos históricos. Se produjeron inundaciones de gran extensión en las Vegas Media y Baja del río Segura (de más de 500 km^2) donde el agua discurrió a gran velocidad en algunas zonas (flujos preferentes), mientras que en la gran mayoría permanecieron anegadas durante días debido a la dificultad de drenaje (tanto por sus características geológicas como por la ocupación del territorio). El río Segura a su paso por Murcia estuvo a punto de desbordar, y aguas abajo de esta ciudad, a la altura de la pedanía de El Raal, el encauzamiento del río se rompió, tras el registro de las lluvias más fuertes. Hubo otros puntos de rotura de la mota del encauzamiento. El municipio de Orihuela también se inundó debido al cuello de botella formado por el monte de San Miguel y a la falta de capacidad del río Segura a su paso por este municipio, con secciones críticas de capacidad menor a 350 m^3/s. El municipio de Orihuela también se vio gravemente afectado por el desbordamiento de la rambla de Abanilla.

El 29 de enero de 2020 se firmó en Orihuela un convenio entre la Diputación de Alicante y Suez Spain para la implantación de la plataforma Smart River Basins en la Vega Baja del Segura, con el fin de incrementar la resiliencia de la zona ante los fenómenos hídricos extremos (sequías e inundaciones). Todo ello amparado dentro de las bases marcadas en la «Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible» aprobada por las Naciones Unidas, que incide en la necesidad de promover aquellas actuaciones que contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejore progresivamente la calidad de la tierra y el suelo.

Como uno de los mecanismos para lograr estos objetivos, la Agenda 2030 (ONU, 2015) promueve el uso de las alianzas, tanto con el sector público como con el sector privado (Objetivo 17). En relación con este último punto, las Nacionales Unidas «exhort(an) a todas las empresas a que aprovechen su creatividad e innovación para resolver los problemas relacionados con el desarrollo sostenible» (Objetivo 17).

3.2. Seguimiento de la sequía y la escasez

Tal y como se ha comentado anteriormente, dentro de este módulo se pretende llevar a cabo un seguimiento de la sequía prolongada y de la escasez coyuntural, atendiendo a los criterios marcados en el vigente plan especial de sequías de la demarcación del Segura (PES en adelante), aprobado por medio de la Orden TEC/1399/2018 de 28 de noviembre (BOE de 26 de diciembre de 2018).

La Vega Baja del Segura se enclava dentro de la Unidad Territorial de Sequía UTS 1 y la Unidad Territorial de Escasez UTE 1, coincidentes espacialmente ambas unidades territoriales. Se corresponde con las subzonas hidráulicas de la demarcación, dominadas por los embalses de cabecera del Talave, Fuensanta y Cenajo o dominadas por las infraestructuras del trasvase y postrasvase. En estas zonas se aplican recursos superficiales y subterráneos de la propia cuenca del Segura, recursos de los trasvases del Tajo y del Negratín, recursos depurados y los recursos desalinizados. Esta UTE es la zona que concentra el déficit de aplicación reconocido en el Plan Hidrológico y que presenta escasez estructural.

Según el PES, los recursos de los que dispone la UTE 1 se cifran en 947,4 hm^3 anuales, repartidos entre diferentes orígenes, tal y como se puede observar en la
Tabla 1.

Origen del recurso	hm^3 anuales
Recursos en régimen natural	227,3
Transferencias Tajo	305
Transferencias Negratín	17
Desalación	158
Reutilización directa	76,8
Reutilización indirecta	52,5
Retornos agrarios	110,8
	947,4

Tabla 1. Resumen de recursos para la UTE 1. Fuente: elaboración propia a partir del PES de la demarcación del Segura.

Por otra parte, las demandas que se abastecen, según el PES de la demarcación del Segura (
Tabla 2) ascienden a 1.572 hm^3 anuales, lo que pone de manifiesto el déficit estructural existente en la demarcación del Segura, y que se concentra en gran parte en esta Unidad Territorial de Escasez.

Tipo de demanda	hm^3 anuales
Urbana	222,3
Agraria	1.298,3
Industrial no conectada	6,9
Servicios (Riego Campos de Golf)	11,4
Ambiental consuntivo, humedales y manten. interfaz acuif. costeros	33,6
Total	1.572,5

Tabla 2. Resumen de demandas para la UTE 1. Fuente: elaboración propia a partir del PES de la demarcación del Segura.

Con la implantación del módulo de sequía se puede realizar un seguimiento completo de la evolución de cada uno de los indicadores, así como del estado en el que se encuentra cada una de las unidades territoriales de sequía y escasez.

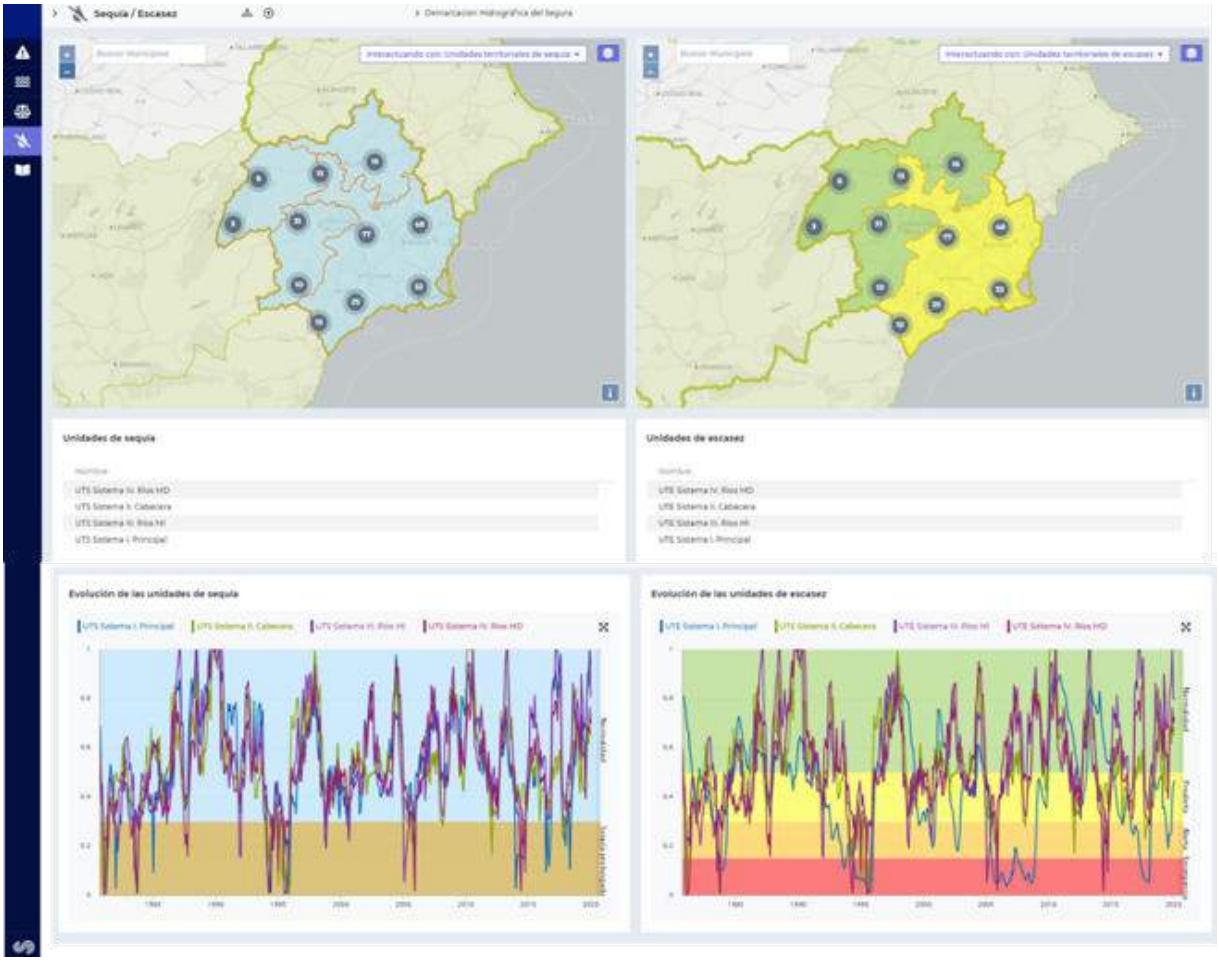


Figura 8. Evolución de los índices de estado de sequía y escasez en la Demarcación Hidrográfica del Segura, donde se aprecia el estado de normalidad respecto a la sequía y de prealerta de escasez de la Unidad Territorial de Escasez (UTE) 1 –Principal, el historial de frecuentes sequías y alertas, prealertas y emergencias de escasez en cada una de las Unidades Territoriales de Sequía (UTS) y UTE. Fuente: Smart River Basins.

3.3. Aplicación del Sistema de Alerta frente a inundaciones

Dentro del convenio firmado con la Diputación, uno de los objetivos principales es dotar a los municipios de la Vega Baja de una herramienta de aviso y gestión de inundaciones que pueda ayudarles a mitigar los efectos causados por fenómenos como la DANA del año 2019.

Para ello, dentro de la plataforma Smart River Basins, se ha implantado un Sistemas de Alerta Temprana (SAT) particularizado para esta región, contando con la colaboración de HYDS y su plataforma ARGOS-City.

Se ha configurado para cada uno de los 27 municipios de la Vega Baja un SAT que permite a cada usuario del municipio visualizar datos en tiempo real, así como las predicciones hidrometeorológicas (intensidad de lluvia, caudales), que cruzados con los datos de vulnerabilidad incorporados y mediante algoritmos lógicos proporcionan la generación/publicación de alertas y el seguimiento de la gestión de la emergencia. A continuación, se incluye una descripción resumida de estos procesos:

- **Datos en tiempo real y predicciones hidrometeorológicos**

La visualización de productos meteorológicos e hidrológicos de índole diversa. Estos se actualizan en tiempo real y permiten tanto monitorizar la situación actual como anticipar potenciales situaciones

de peligro. Se accede a los distintos productos con el menú de datos de peligro, dividido los apartados que se detallan a continuación: Sensores, Radar de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Modelos numéricos de previsión meteorológica (ECMWF), avisos oficiales AEMET y avisos hidrometeorológicos de cauce.

✓ Sensores

Contiene los datos en tiempo real de distintas redes de sensores. La localización de los sensores se representa sobre el mapa con el icono correspondiente a cada tipo de sensor, y los colores del icono indican en cada momento la superación de umbrales predefinidos.

En cada sensor se puede visualizar el valor de la variable pulsando el icono correspondiente, y dándole al botón "Ver Gráfica" se muestra la evolución temporal de la variable para ese sensor.



Figura 9. Pluviómetros de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y gráfica de evolución de los datos de un sensor junto con los umbrales predefinidos. Fuente: Plataforma Smart River Basins/Argos.

✓ Radar AEMET

Además, se tiene acceso a los datos de la red de radares meteorológicos de AEMET en tiempo real. En base a los datos radar se ejecuta un algoritmo de previsión a muy corto plazo (*nowcasting*) desarrollado en la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña). Este algoritmo (Berenguer et al., 2005; 2011) se compone de dos fases:

- Estimación de movimiento: Partiendo de la evolución de la lluvia en los 2 o 3 pasos de tiempo más recientes se estima el campo de desplazamiento.
- Extrapolación de lluvia: Las previsiones de lluvia para las siguientes horas se obtienen proyectando hacia el futuro la lluvia más reciente mediante el campo de desplazamiento obtenido.

La aplicación de este algoritmo permite que todos los productos derivados de radar tengan hasta 2 horas de previsión además de los valores observados en tiempo real.

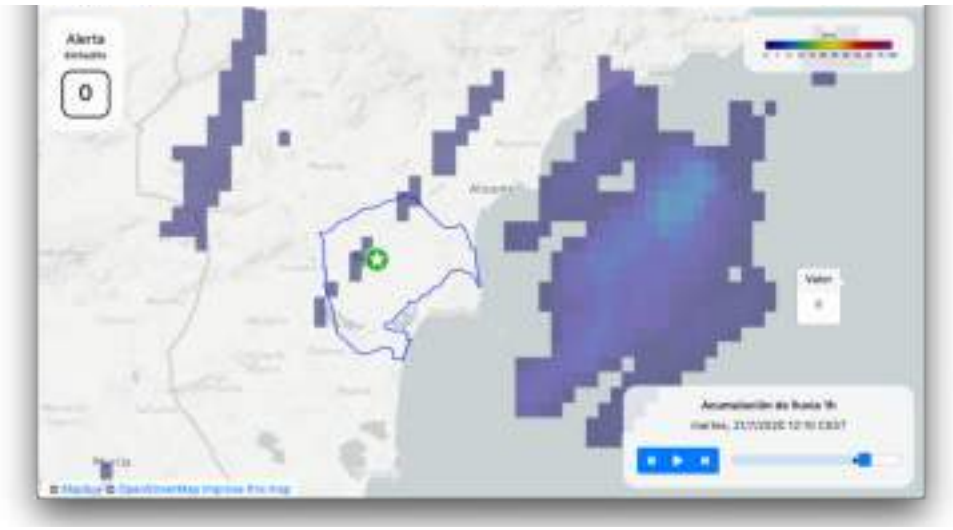


Figura 10. Campo de lluvia acumulada en 1 h. Fuente: Plataforma Smart River Basins/Argos.

- ✓ Modelos numéricos de previsión meteorológica (ECMWF)

Los modelos de predicción meteorológica numérica (NWP en inglés, de Numerical Weather Prediction model) hacen referencia a los sistemas que usan datos meteorológicos actuales (observaciones) para alimentar complejos modelos fisicomatemáticos de la atmósfera para predecir la evolución meteorológica. Los modelos NWP parten de datos obtenidos en radiosondeos, satélites meteorológicos y, observaciones meteorológicas (radar, sensores, etc.).

Estos datos se utilizan en los modelos como punto de partida para las previsiones que cubren varios días vista con una resolución temporal típicamente horaria y espacial de varios km de resolución.

- ✓ Avisos oficiales (AEMET)

En la plataforma se incluyen los avisos que la AEMET emite sobre los fenómenos atmosféricos adversos que puedan afectar a España de acuerdo con el Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos (Meteoalerta). Los avisos se han definido teniendo en cuenta tanto la frecuencia de cada fenómeno (cuanto menos frecuente sea, menos preparada está la población) como la adversidad (para dicha población). Estos avisos tienen un alcance de 3 días y resolución horaria. Se incorpora para las zonas de interés avisos para los siguientes fenómenos:

  - o Acumulación de lluvia (en 1 h y en 12 h).
  - o Tormentas.

- ✓ Avisos hidrometeorológicos de cauce.

Se ha implementado un algoritmo de avisos de río, que agrega la lluvia de la cuenca contributiva al píxel (con una resolución superior a 500 m) y se acumula durante el tiempo de concentración de la cuenca definida por el mismo. Los valores obtenidos se comparan de nuevo con tablas IDF para asignar valores de periodos de retorno. Estas alertas son útiles para anticipar crecidas en cauces pequeños y medianos (hasta 100-200 de km^2) y generar alertas tempranas sobre elementos vulnerables ubicados cerca de los cauces.

Esta metodología es una forma alternativa de generar alertas de *Flash-Floods* que no requiere información sobre las condiciones iniciales y permite rapidez en la calibración de parámetros para cuencas individuales y tiempos cortos de cálculo.

- **Datos de vulnerabilidad.**

Otros datos fundamentales para la generación de alertas y la gestión de inundaciones son los que permiten tener la información de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo para cruzarlos con los datos

hidrometeorológicos. Por ello se integran dentro del SAT las capas siguientes:

- Información de peligrosidad y riesgos mediante la cartografía de peligrosidad y riesgo generada en el SNCZI.
- Información sobre elementos expuestos y puntos críticos de cada municipio.



Figura 11. Capa de riesgos en Orihuela. Fuente: Plataforma Smart River Basins/Argos.

- **Generación de alertas**

El sistema permite generar alertas, como combinación lógica de los distintos productos de alerta (datos de sensores, productos de previsión, etc.). Estas alertas están basadas en umbrales sobre los datos incorporados en la plataforma y sobre combinaciones de dichos datos.
Se dispone de tres niveles de alerta, con la idea de destinar a la prevención el primer nivel de alerta, y niveles de alerta más altos a la protección y reacción frente a las emergencias.

La generación y diseminación de alertas se puede realizar a distintos niveles de detalle:

- Nivel de municipio.
- Nivel de elementos críticos (edificaciones, infraestructuras, etc.).

El municipio o los elementos vulnerables se cruzan en tiempo real con la información de peligrosidad para generar alertas. La figura 12 muestra un esquema de ejemplo.

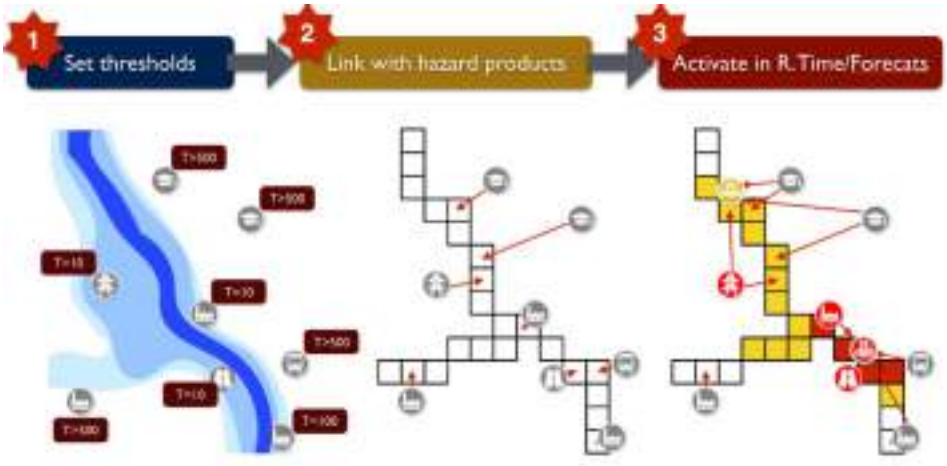


Figura 12. Esquema de la activación de elementos críticos en tiempo real.

1) los elementos tienen umbrales de activación, basados en conocimiento previo o cruzando de forma automática con cartografía de riesgo.

2) Los elementos están vinculados a productos de previsión y/o observación (alertas de río, sensores, etc.).
3) En tiempo real, si el producto supera el umbral se emite aviso.

Umbrales sobre productos

Para cada elemento (ya sea el municipio en si o un elemento crítico) y cada producto se pueden definir 3 umbrales.

Por ejemplo, para el "pluviómetro Abanilla" y el municipio de Orihuela, podemos definir tres umbrales. Para el mismo pluviómetro y un elemento crítico de Orihuela, podemos definir 3 umbrales distintos.

- Para productos *raster*

En los productos *raster* (*grid* de datos), existen dos opciones de configuración para establecer umbrales:

- Usar la serie temporal de valores en un píxel concreto del *raster* y establecer los umbrales sobre esta serie.
- Calcular una función sobre un área del ráster y establecer los umbrales sobre esta función.

La primera opción permite usar los datos del campo ráster en el punto concreto de interés para generar alertas. Por ejemplo, podemos usar la serie temporal de previsión de intensidad de lluvia en base a radar en un punto concreto para definir umbrales en intensidad de lluvia.

La segunda opción nos permite usar los valores del campo *raster* en toda un área, usando una función para obtener una serie temporal y establecer umbrales. Por ejemplo, podemos calcular el máximo en el área del municipio de las previsiones de modelos numéricos definir umbrales sobre estas previsiones; de esta forma si en algún punto del municipio se prevé superar el umbral, se generará una alerta.

- Configuración/lógica de las alertas

Para configurar un nivel de alerta (de los tres disponibles) para un elemento (ya sea el municipio en si o un elemento crítico) se deben seguir los siguientes pasos:

- Establecer los tres umbrales para los productos que queremos usar para definir el nivel de alerta.
- Establecer la regla lógica de activación sobre los productos y umbrales que queremos usar.

Por ejemplo, si queremos que el nivel 2 de alerta sobre el hospital de Orihuela se active en caso de que "pluviómetro A" > 20 mm o bien "el máximo de la previsión de radar dentro del municipio" > 20 mm deberemos:

1) Establecer para el "pluviómetro A" un umbral (por ejemplo, el 2) como 20 mm para el punto crítico del hospital de Orihuela.
2) Establecer para "el máximo de la previsión de radar dentro del municipio" un umbral como 20 mm (por ejemplo, el 2) para el punto crítico del hospital de Orihuela.
3) Establecer la regla lógica de activación para el nivel 2 para el punto crítico del hospital de Orihuela: (pluviómetro A > Nivel 2) o (máximo de la previsión de radar dentro del municipio > Nivel 2).

- **Diseminación de las alertas**

Las alertas generadas a los distintos niveles (nivel municipal o nivel de elemento crítico) pueden ser diseminadas mediante varios canales:

- Visor de la plataforma.

- Por SMS.
- Por correo electrónico.

- **Seguimiento de la emergencia**

Este módulo se considera relevante e importante, porque para cada elemento (municipio en si o elemento crítico) y cada nivel de alerta, al usuario le permite:

- Definir una serie de acciones a realizar con el objetivo de mejorar los protocolos de autoprotección y la gestión de las emergencias, guarda registro del ciclo de vida de las acciones, etc.
- Supervisar en qué momento se activó la acción (en qué momento se generó la alerta relacionada) y esta quedó pendiente en la lista de acciones.
- En qué momento se marcó la acción como realizada.
- Qué usuario marcó la acción como realizada.

Cada usuario de municipio dispone de un apartado de configuración donde definir los usuarios del sistema (personal involucrado en el seguimiento de las situaciones, personal asociado a la ejecución de acciones, etc.) y sus datos para la difusión de alertas (correo electrónico, SMS).

4. CONCLUSIONES

El actual contexto de extremos climáticos, con episodios de sequía, escasez e inundaciones cada vez más frecuentes y acusados hace necesario desarrollar medios de adaptación que mejoren nuestra capacidad para superar dichos episodios con el mínimo impacto en nuestras actividades. En una situación de crisis, la disponibilidad de información objetiva y fiable es de vital importancia para la toma de decisiones, y la antelación con que se disponga de dicha información es, si cabe, más importante aún.

El desarrollo, actualmente en curso, de la plataforma Smart River Basins implantada por Suez en coordinación con la Diputación Provincial de Alicante en los municipios de la Vega Baja del Segura es un gesto fruto del compromiso de Suez para ser el aliado de la sociedad, las administraciones, la ciudadanía y sus organizaciones en la superación de los retos del desarrollo sostenible y la adaptación y la mitigación de los efectos del cambio climático y el cambio global.

Su utilización por los gestores de los municipios de la comarca y de la propia Diputación de Alicante permitirá que puedan anticiparse en su preparación y su respuesta a los fenómenos extremos como las sequías y las inundaciones, aprovechando las oportunidades que la transformación digital puede ofrecer a nuestra sociedad para resultar más inteligentes, adaptables y prósperos.

REFERENCIAS

- Alfieri, L., Berenguer, M., Knechtl, V., Liechti, K., Sempere-Torres, D. y Zappa, M., (2019). Flash Flood Forecasting Based on Rainfall Thresholds. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, 1223-1260. Springer Berlin Heidelberg, Berlin.
- Berenguer, M., Corral, C., Sánchez-Diezma, R. y Sempere-Torres, D. (2005). Hydrological validation of a Radar-Based Nowcasting Technique. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4), 532-539.
- Berenguer, M., Sempere-Torres, D. y Pegram, G. (2011). SBMcast - An ensemble technique to assess the uncertainty in rainfall forecasts by Lagrangian persistence. *Journal of Hydrology*, 404, 226-240.
- Confederación Hidrográfica del Segura (2020). *Cronología de riadas en la Cuenca del Segura*. https://bit.ly/2ZUIXW8

- Corral, C., Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Poletti, L., Silvestro, F. y Rebora, N., (2019). Comparison of two early warning systems for regional flash flood hazard forecasting. *Journal of Hydrology,* 572, 603-619.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L. M. y Demuth, S. (2001). Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *Int. J. Climatol*., 21, 317-333. https://doi.org/10.1002/joc.619
- Ministerio para la Transición Ecológica (2018). *Orden TEC/1399/2018, de 28 de noviembre, por la que se aprueba el Plan Especial de Sequías de la Demarcación Hidrográfica del Segura*. BOE, 26/12/2018. https://bit.ly/30zKuQM
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (2015-2021)*. BOE, 19/01/2016. https://bit.ly/2WOe5oA
- ONU (2015) Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de La Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas. https://bit.ly/3hy1bD9
- Parlamento Europeo y Consejo (2007). *Directiva 2007/60/CE, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación*. http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj
- Ritter, J., Berenguer, M., Corral, C., Park, S. y Sempere-Torres, D. (2020). ReAFFIRM: Real-time Assessment of Flash Flood Impacts - A Regional high-resolution Method. *Environment international*, 136, 105375. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105375
- Trenberth, K., Dai, A., van der Schrier, G. *et al.* (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Clim Change,* 4, 17-22. https://doi.org/10.1038/nclimate2067

METEOROLOGÍA DE LAS INUNDACIONES MEDITERRÁNEAS

Agustí Jansà Clar
Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, España
agusti.jansa@gmail.com

RESUMEN

Se consideran en esta ponencia las inundaciones rápidas, normalmente asociadas a precipitaciones intensas, de duración relativamente corta. Este tipo de inundación afecta en España, básicamente, a la vertiente mediterránea. Ello nos lleva a una breve aproximación climatológica al problema, que apunta a una reconocida singularidad meteorológica y climática mediterráneas. En el trabajo se revisan, a diversas escalas, las condiciones meteorológicas que suelen ir asociadas a las lluvias fuertes en el Mediterráneo español, susceptibles de producir inundaciones rápidas. Es obligado plantear el papel que juegan las perturbaciones en altura de escala grande, como las vaguadas y las danas o gotas frías, así como los centros ciclónicos a nivel bajo. De hecho, los centros ciclónicos a nivel bajo, intensos, moderados o débiles, de escala grande o de mesoscala, son el tipo de perturbación meteorológica más frecuentemente asociado con las lluvias fuertes mediterráneas, probablemente ligado a su papel en la organización del flujo húmedo alimentador de la lluvia fuerte. Se considera, por último, el papel que puede jugar la convección, particularmente organizada, en la precipitación mediterránea intensa.

1. LLUVIAS FUERTES MEDITETRÁNEAS: APROXIMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Lluvias fuertes, susceptibles de producir inundaciones rápidas o repentinas, se pueden producir en cualquier punto del territorio español, si bien la probabilidad, la frecuencia del fenómeno no es homogénea, ni mucho menos. Lo primero que llama la atención (figura 1) es el notable desequilibrio que hay entre la vertiente atlántica y la vertiente mediterránea (incluyendo, en ella, las Illes Balears).

En la figura 1 se comparan la precipitación anual total (arriba) y la media anual de la precipitación máxima en 24 (abajo). Esta segunda magnitud es más apropiada que la precipitación total anual media para extraer una idea climatológica de la incidencia de las lluvias fuertes, torrenciales.

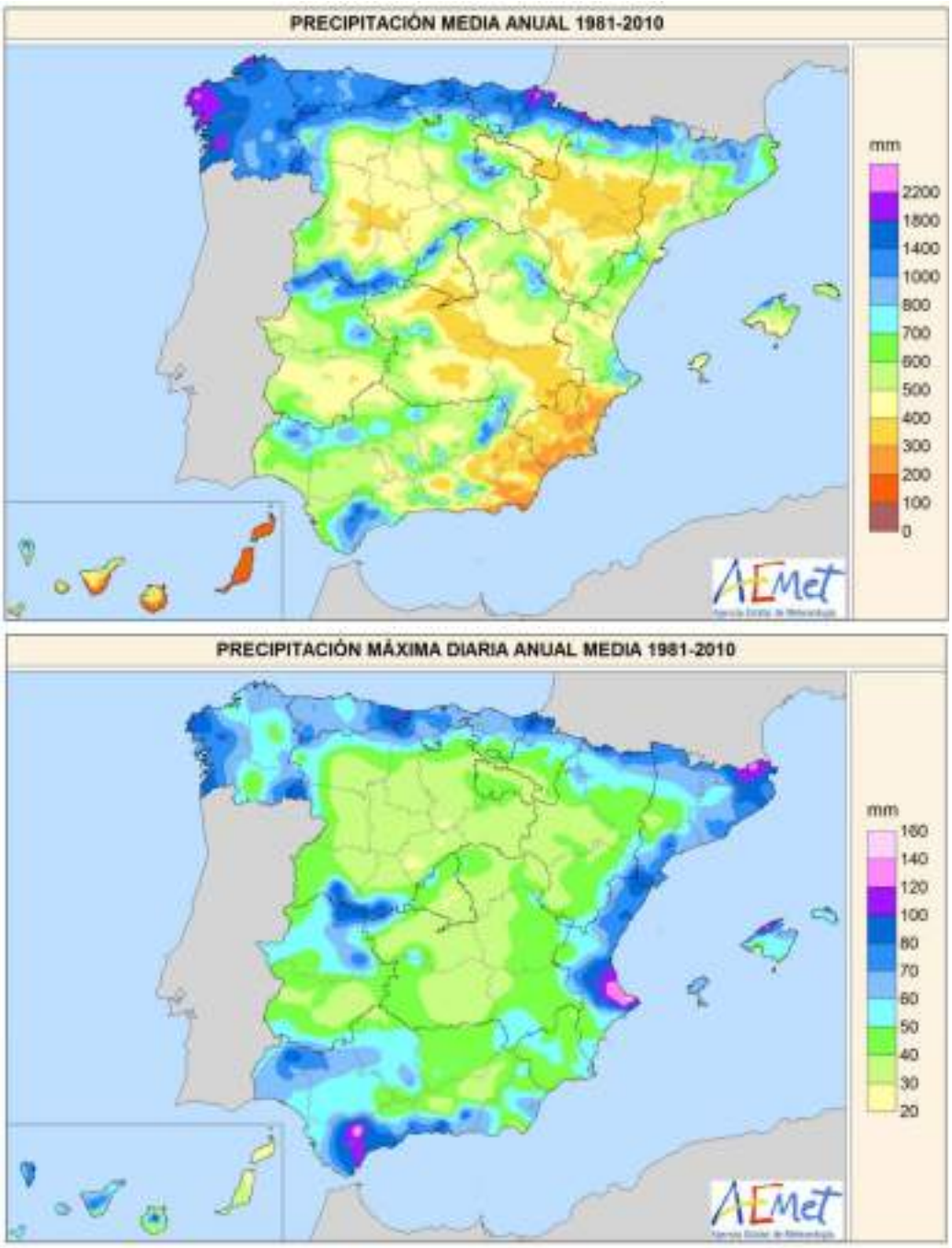


Figura 1. Mapas de precipitación total anual media (arriba) y de precipitación máxima diaria anual media (abajo). Fuente: AEMET, Chazarra et al. (2018)

Salvo algunas áreas particulares, no hay una buena correspondencia entre las áreas más lluviosas, con precipitaciones anuales medias superiores a 1000 o 1400 mm, y las áreas con mayores medias anuales de precipitación diaria máxima, superior a 80 o 100 mm. Las primeras se sitúan, básicamente, en zonas del noroeste y norte peninsular, mientras las segundas se esparcen por la zona mediterránea. Ésa es la particularidad del área mediterránea: sin albergar las mayores precipitaciones totales anuales, concentra las precipitaciones más intensas, las más proclives a producir inundaciones rápidas.

Clave	*Nombre*	*Extensión*	*Densidad*	*Período*	*Total Casos*	*Casos/Año*
04	Digne	Pequeña	Alta	1993-96	14	3,5
05	Embrun	Pequeña	Alta	1993-96	9	2,3
06	Nice	Pequeña	Alta	1993-96	32	8,0
13	Marseille	Pequeña	Alta	1993-96	16	4,0
83	Toulon	Pequeña	Alta	1993-96	29	7,3
84	Avignon	Pequeña	Alta	1993-96	20	5,0
	Francia S (E)			*1993-96*	*120*	*30,0*
11	Carcassone	Pequeña	Alta	1993-96	31	7,8
30	Nimes	Pequeña	Alta	1993-96	70	17,5
34	Montpellier	Pequeña	Alta	1993-96	38	9,5
48	Mende	Pequeña	Alta	1993-96	35	8,8
66	Perpignan	Pequeña	Alta	1993-96	21	5,3
	Francia S (W)			*1993-96*	*195*	*48,8*
20	*Corse*	*Moderada*	*Moderada*	*1993-96*	*49*	*12,3*
BA	Barcelona	Moderada	Alta	1992-96	34	6,8
GI	Girona	Moderada	Alta	1992-96	36	7,2
LL	Lleida	Moderada	Alta	1992-96	18	3,6
TA	Tarragona	Moderada	Alta	1992-96	22	4,4
	Catalunya			*1992-96*	*110*	*22,0*
AL	Alacant	Moderada	Alta	1992-96	44	8,8
CS	Castelló	Moderada	Alta	1992-96	25	5,0
VC	València	Moderada	Alta	1992-96	57	11,4
MU	Murcia	Moderada	Alta	1992-96	19	3,8
	Val-Murcia			*1992-96*	*145*	*29,0*
AM	Almeria	Moderada	Moderada	1992-96	6	1,2
GR	Granada	Moderada	Moderada	1992-96	7	1,4
MA	Málaga	Moderada	Moderada	1992-96	16	3,2
	And. Orient.			*1992-96*	*29*	*5,8*
IB	Eivissa	Muy peq.	Muy alta	1992-96	15	3,0
MH	Menorca	Muy peq.	Muy alta	1992-96	9	1,8
PM	Mallorca	Muy peq.	Muy alta	1992-96	82	16,4
	Balears			*1992-96*	*106*	*21,2*

Tabla 1. Número de casos de precipitación igual o superior a 60 mm / 24 h en pluviómetro, en distintos territorios mediterráneos de España y Francia. Fuente: Jansà et al. (2001). Los datos pluviométricos, incluyendo estaciones de las redes climatológicas complementarias, fueron facilitados por los servicios meteorológicos de Francia, España y Catalunya. Un mismo caso puede ser contabilizado varias veces si ha afectado, el mismo día, a distintas unidades territoriales.

Cabe destacar que las precipitaciones máximas anuales en 24 h no presentan, en absoluto, valores homogéneos en toda la vertiente mediterránea. Al contrario, hay unas pocas y pequeñas zonas con máximos bien destacados. A la vista de la Fig. 1, inferior, las áreas más proclives a precipitaciones de gran intensidad son, en la Comunidad Valenciana, la zona sur de la provincia de Valencia y norte de la de Alicante, otra zona se sitúa en el norte de Girona, otra en las montañas entre Cádiz y Málaga y otra, especialmente pequeña, en la Serra de Tramuntana, de la isla de Mallorca.

Tomando los datos de Jansà et al. (2001) y siguiendo con la aproximación climatológica, la tabla 1 nos indica el número de casos (días) en los que se han superado los 60 mm en pluviómetros de distintas provincias o islas (en España) y departamentos (en Francia) durante una serie de años. No son datos homogéneos (debido a diferencias de extensión de la unidad territorial, densidad de pluviómetros y período de muestreo) y, por tanto, no son perfectamente comparables, pero ayudan a dar una idea de cómo es la distribución territorial de las lluvias fuertes, dentro de la zona mediterránea.

A pesar de las inhomogeneidades citadas y la brevedad del período de muestreo (4 o 5 años), hay una buena congruencia entre el mapa de la figura 1, inferior, y la tabla 1. De acuerdo con la tabla, las principales áreas de acumulación de episodios de lluvias fuertes están en situadas en València, en España, y en Nimes, en Francia. Llama la atención el máximo de Mallorca –al nivel de los anteriores, aunque puede estar relacionado con la muy alta densidad de estaciones pluviométricas. Máximos secundarios están localizados hacia Girona y hacia Málaga (o Cádiz), aunque este último tiene menor entidad.

Las lluvias fuertes mediterráneas, además de estar muy concentradas espacialmente, son, también muy estacionales. Es muy ilustrativo, en ese sentido, el mapa de estacionalidad de las lluvias de más de 100 mm /24 h en la Comunidad Valenciana, publicado por Armengot (2002), figura 2. La concentración de casos en otoño, particularmente en el sur de València i norte de Alacant, es abrumadora.

Se puede decir que la concentración otoñal de las lluvias fuertes es general en toda la cuenca mediterránea occidental, pero hay matices, en función de las regiones concretas. Así, Llasat et al. (2014), con referencia a Catalunya, analizando, no las lluvias fuertes en sí, sino su consecuencia, es decir, las inundaciones, directamente, si bien encuentra el máximo de inundaciones en otoño (48% del total), el porcentaje correspondiente a verano no es pequeño (33%). Por meses, el máximo de inundaciones en Catalunya corresponde al septiembre, seguido de octubre y agosto. Si se consideran sólo las inundaciones catastróficas, el predominio otoñal vuelve a ser extremadamente marcado: el 75% de las inundaciones catastróficas en Catalunya ocurre en otoño (SON).

El diferente comportamiento pluviométrico entre las vertientes atlántico-cantábrica y mediterránea, por un lado, la alta concentración, dentro del Mediterráneo, de núcleos particularmente favorables a la lluvia muy intensa, y la extrema estacionalidad sugieren que la meteorología de las lluvias fuertes mediterráneas está muy condicionada por factores geográficos, de gran escala y de pequeña escala.

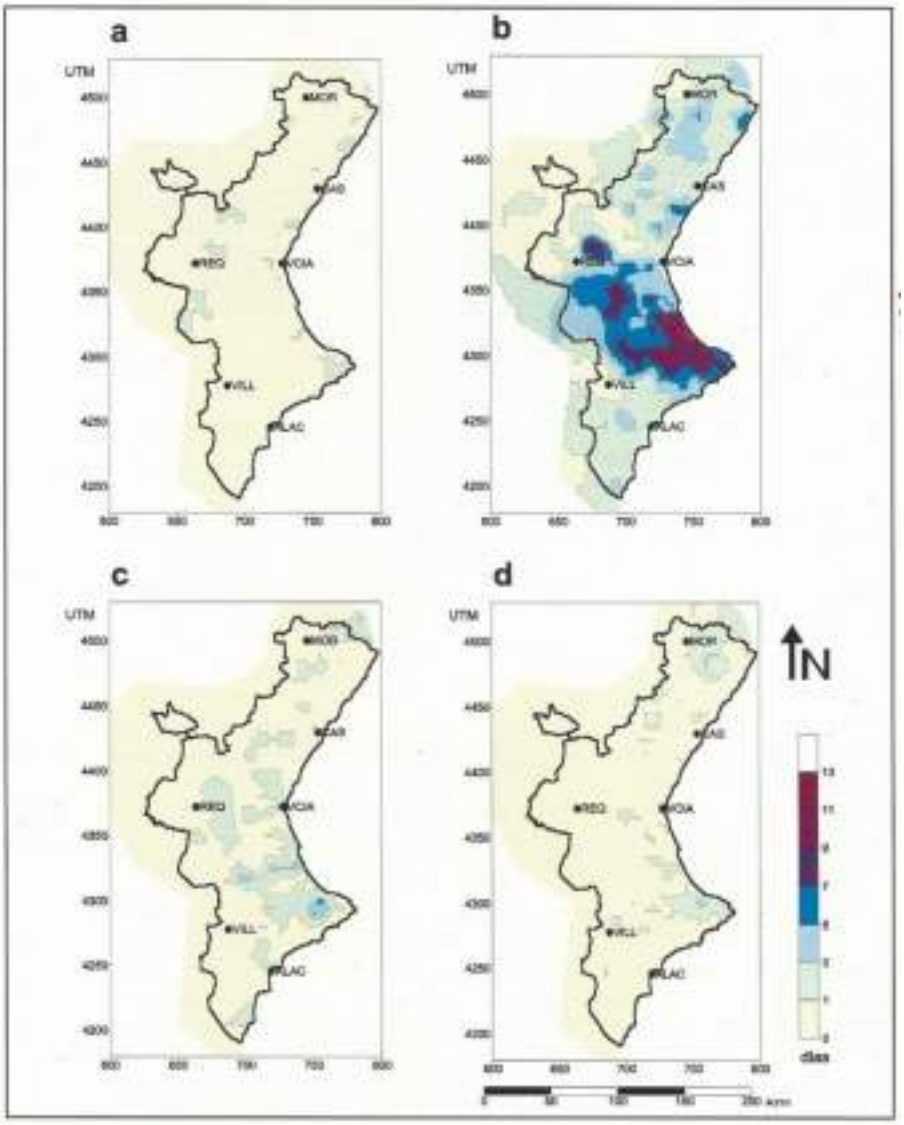


Figura 2. Número de casos, por unidad de área, de precipitación superior a 100 mm /24 h, en la Comunidad Valencia, en el período 1976-90, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d). Fuente: Armengot (2002).

2. FACTOR GEOGRÁFICO-CLIMÁTICO

El Mediterráneo, particularmente el occidental, puede ser visto como una olla, como una cubeta (Jansà Guardiola, 1966), cuyo interior, además de estar lleno de un mar profundo, puede, desde el punto de vista atmosférico, aislarse parcialmente del exterior. Una de las consecuencias del aislamiento es la posibilidad de formación de una masa de aire autóctona, de no mucho espesor, y cuyas características físicas están condicionadas por la temperatura del agua, en relación al aire (Jansà Guardiola, 1959).

La región mediterránea se caracteriza, desde el punto de vista climático, por la existencia de un verano largo, caluroso y seco, propiciado por el dominio, en esa época, del anticiclón subtropical, que limita, por el norte, la circulación tropical y que, en verano, se sitúa a latitudes mediterráneas, por el desplazamiento estacional que sufren todos los elementos de la circulación general atmosférica. El largo, seco y cálido verano mediterráneo y el carácter casi cerrado del mar, suponen un notable calentamiento progresivo del agua marina, hasta una cierta profundidad. Este calentamiento se

completa a finales de verano, manteniéndose el carácter cálido del agua, en relación con el aire, durante todo el otoño e incluso parte del invierno. La temperatura media superficial del agua del mar en agosto es de unos 26-27ºC en la zona del Mar Balear (ver, por ejemplo, CEAM: http://www.ceam.es/ceamet/SST/SST-climatology.html). En octubre, en la misma zona, hay, todavía, unos 23ºC, en promedio, mientras la temperatura media del aire en Illes Balears, en las zonas costeras, ha bajado a unos 19-20ºC (Jansà, 2014). Desde final del verano, por tanto, durante todo el otoño, e incluso parte del invierno, el aire del fondo de la cubeta mediterránea se carga de calor y humedad desde el mar, cuando se estaciona, lo que supone la disponibilidad de alta cantidad de agua precipitable, además de una cierta inestabilización vertical del aire. Ambas cosas favorecen la lluvia intensa y copiosa, frecuentemente convectiva. Se explica por qué son tan importantes y estacionales las lluvias fuertes mediterráneas, en relación al Atlántico.

Otro factor geográfico favorable a la lluvia fuerte mediterránea lo constituyen algunos elementos del relieve local. Las paredes montañosas que cierran la cubeta mediterránea son, en verdad, bastante complejas orográficamente. Sierras costeras de altitud moderada, pero con fuertes pendientes, forman un primer escalón orográfico, que es bastante discontinuo. Las concentraciones más importantes de precipitación intensa se distribuyen en el entorno de algunos de los marcados relieves de ese primer escalón, cercanos a las costas, como son las estribaciones del macizo central francés, las estribaciones marítimas pirenaicas y las sierras costeras catalanas, los relieves de la península del cabo de Sant Antoni (sierras de Mariola, Aitana, etc.), las serranías interiores de Málaga (como Ronda) o incluso la Serra de Tramuntana, de Mallorca. Esos relieves, cercanos al mar, pueden forzar el ascenso del aire cálido y húmedo mediterráneo, generando lluvia orográfica fuerte, directamente, o bien iniciando y anclando lluvia convectiva.

Una lluvia suficientemente copiosa como para provocar una inundación repentina ha de ser sostenida durante un tiempo y de fuerte intensidad. Se deduce que ha de haber un ascenso del aire rápido, vigoroso, mantenido un tiempo, con disponibilidad de abundante agua precipitable, que, de algún modo, vaya reponiendo, a ritmo suficiente, el agua que la lluvia va separando. La geografía mediterránea –mar y montañas- nos proporciona ingredientes para la lluvia fuerte. En los siguientes apartados se verá si hay una meteorología adecuada para completar los requerimientos (Doswell et al., 1996).

3. METEOROLOGÍA MACROESCALAR

El ascenso (o descenso) forzados por configuraciones de escala grande (sinóptica o macroescalar), como las borrascas, vaguadas, danas o gotas frías, etc. son, en ausencia de convección, lentos, del orden de los cm/s, desde unos pocos cm/s hasta algunas decenas de cm/s. La convección, en cambio, que se alcanza y arranca espontáneamente cuando el gradiente vertical de temperatura ambiente supera el llamado gradiente adiabático (1ºC/100 m), o, si hay saturación, el gradiente pseudoadiabático (aproximadamente 0,6ºC/100 m), supone ascensos (y descensos) del orden de decenas de m/s, alrededor de dos órdenes de magnitud superiores a los movimientos verticales puramente macroescalares.

Un ascenso cualquiera del aire siempre supone un aumento de la humedad relativa, de manera que, si es suficientemente prolongado, se llega a la saturación y a la formación de lluvia. La intensidad de la precipitación –en condiciones semejantes de temperatura y humedad- dependerá, básicamente, de la velocidad del ascenso. Será difícil, pues, que con ascensos sólo sostenidos por configuraciones sinópticas o macroescalares haya precipitaciones de gran intensidad, susceptibles de producir inundaciones rápidas o repentinas. Configuraciones sinópticas apropiadas al ascenso no son suficientes para las grandes lluvias mediterráneas, salvo que vayan acompañadas de convección o se refuercen por ascensos orográficos. Las fuertes pendientes de algunos relieves mediterráneos

cercanos a la costa pueden incrementar mucho los ascensos sinópticos. Podemos imaginar relieves con un 10 o un 20% de pendiente: si contra ellos avanza un flujo aéreo (húmedo) a 10 m/s, tendremos ascensos añadidos superiores a 1 m/s, intermedios, por tanto, en orden de magnitud, entre un ascenso solamente sinóptico y un ascenso convectivo típico. Ascensos orográficos rápidos, asociados a entradas de viento relativamente fuertes, pueden producir acumulaciones de lluvia muy importantes, si se mantienen durante horas, aunque no haya convección.

3.1. Tipos de configuración macroesacalar

Siguiendo el trabajo realizado por Martínez et al. (2008), en el marco del proyecto MEDEX (Jansà et al., 2014), se pueden identificar cuáles son las configuraciones macrometeorológicas más frecuentemente asociadas a las lluvias fuertes mediterráneas. El área considerada en este estudio cubre las zonas mediterráneas española y francesa con una extensión algo mayor que la tomada en cuenta en Jansà et al. (2001), tabla 1 de este trabajo. Las regiones incluidas son Andalucía Oriental (AOR), Aragón (ARN), Illes Balears (BAL), Castilla la Mancha (MCM), Catalunya (CAT), Murcia (MUR) y Comunidad Valenciana (VAL), en España, y Córcega (CO), Costa Azul (CA), Languedoc-Roussillon (LR), Midi-Pyrenees (E) (MP), Provenza-Alpes-(S) (PA) y Ron-Alpes (S) (RA). Puede verse la situación aproximada de esas regiones en la figura 4.

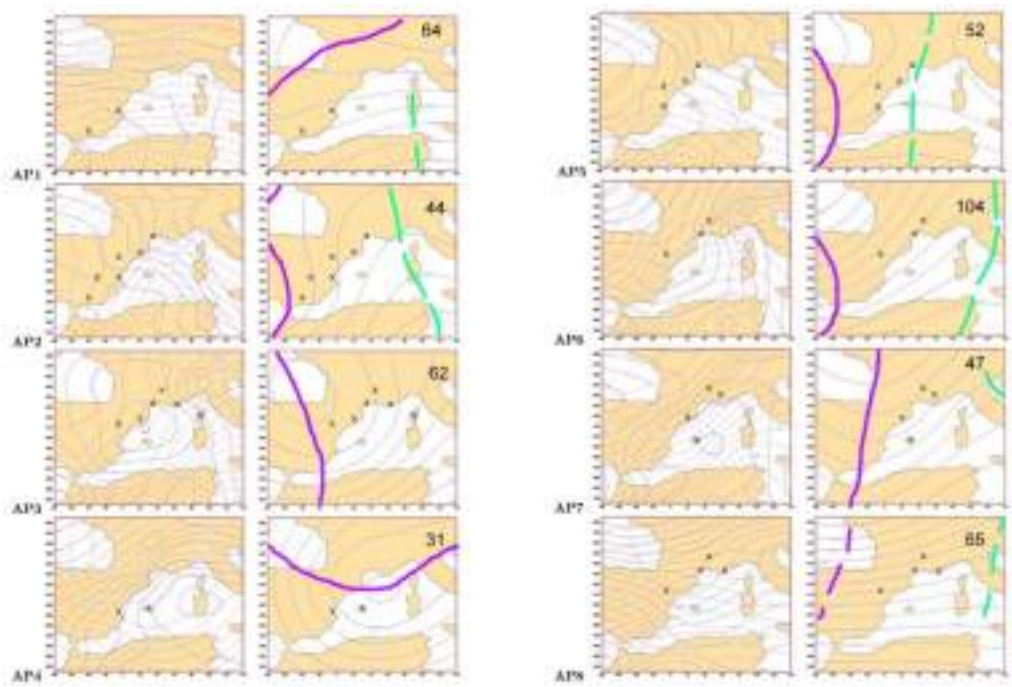


Figura 3. Configuraciones macroescalares asociadas a episodios de lluvia fuerte en el Mediterráneo español y francés. Para cada configuración, el mapa de la izquierda es la altura geopotencial de 1000 hPa (línea llena azul) y la temperatura a 850 hPa (línea a trazos roja); el de la derecha es la altura geopotencial de 500 hPa. En 500 hPa, las líneas violeta gruesas son ejes de vaguada y las líneas verdes gruesas, ejes de dorsal. Las aspas son las regiones más afectadas por lluvia fuerte con cada tipo de configuración. El número en la esquina superior derecha es el correspondiente de episodios clasificados en cada configuración. Fuente: adaptado de Martínez et al. (2008).

Para el análisis se han tomado 472 episodios de lluvia fuerte (definidos, cada uno, en cada región, por una precipitación igual o superior a 60 mm en al menos 4 pluviómetros). El período considerado es 1997-2004. Cada episodio viene caracterizado por una serie de matrices, que son los valores de altura geopotencial a 1000 y a 500 hPa y los de temperatura a 850 hPa, en los puntos de rejilla de una amplia

área que engloba las zonas mediterráneas española y francesa, para el día D (a las 12 UTC) y para el día D-1. Los análisis usados son los operativos del antiguo modelo HIRLAM-INM, previamente suavizados. Se reduce la gran cantidad de variables original mediante un análisis de componentes principales y, a partir, de los valores de las componentes principales correspondientes a cada episodio, se agrupan los episodios, mediante análisis de clúster, tomándose las ocho primeras agrupaciones o clústeres (llamados AP, de *atmospheric patterns*) como definición final de las configuraciones meteorológicas a gran escala que más frecuentemente acompañan a las lluvias fuertes mediterráneas. En la figura 3 cada una de las ocho configuraciones (AP) es representada por los campos medios de altura geopotencial a 1000 hPa y temperatura a 850 hPa (mapa de la izquierda) y de altura geopotencial a 500 hPa (mapa de la derecha).

La primera conclusión a extraer es que no hay un tipo único de configuración meteorológica de gran escala acompañando a los episodios de lluvia fuerte en el Mediterráneo, pero hay factores comunes. En todos los tipos, en 500 hPa las regiones mediterráneas se encuentran *por delante* (al este o al sur) de un eje de vaguada (y/o por detrás de un eje de dorsal). La zona delantera de un eje de vaguada (hacia dónde ésta avanza) es, en altura, una zona divergente, que fuerza ascenso, succionando aire desde las capas bajas. Es, también, bastante común entre los distintos tipos la presencia de zonas depresionarias a nivel bajo (a 1000 hPa): las depresiones de nivel bajo, a escala grande fuerzan, también, en principio, ascenso del aire. En los episodios de lluvia fuerte, las regiones mediterráneas suelen estar situadas, pues, en zona de ascenso macroescalar o sinóptico, con forzamientos ascendente desde arriba y/o desde abajo. Sabemos que los ascensos de aire forzados sinópticamente, macroescalarmente, no son muy intensos y, por tanto, no implican directamente lluvia muy fuerte; pero puede ser un factor favorable. En efecto, cualquier ascenso, además de ser capaz de formar nubosidad y lluvia, siempre que el aire ascendente sea húmedo, aumenta el gradiente térmico vertical, acercándolo al adiabático (o al pseudoadiabático) es decir, tiende a inestabilizar la atmósfera verticalmente, acercándola a condiciones convectivas. Además, una vez alcanzadas esas condiciones, es decir, la inestabilidad, el ascenso sinóptico, aunque lento, puede actuar como factor de arranque de la convección.

Analizando los tipos de configuración en detalle, hay diferencias entre unos tipos y otros. Además, hay una acierta asociación entre tipos diferentes y regiones afectadas por lluvia fuerte. En la figura 4 se representan las frecuencias relativas de cada tipo de configuración asociadas a lluvia fuerte en cada región.

Los tipos de configuración predominantes son diferentes en las diferentes regiones. En VAL y MUR la mayoría de episodios llevan asociados tipos de configuración AP1 o AP2, que tienen algún parecido entre sí. Esos tipos tienen también una frecuencia relativa importante en los episodios de BAL, MCM y CAT. La vaguada en altura es bastante clara, situada al oeste. En nivel bajo, aunque no se ve baja cerrada dentro del Mediterráneo, la circulación es ciclónica, con insinuación de baja abierta entre Illes Balears, Península y norte de África. El flujo en nivel bajo es claramente del componente este sobre Comunidad Valenciana, Murcia, Catalunya e Illes Balears.

En todas las regiones francesas (excepto Córcega) el tipo de configuración AP6 (que es el más frecuente) es claramente predominante y también es mayoritario, aunque no tan marcadamente, en los episodios de ARN, CAT y AOR. En AP6, delante de la vaguada en altura, que es potente y amplia, el flujo es del suroeste, considerablemente fuerte. En nivel bajo hay un flujo del sur (incluso sudeste) muy marcado sobre las zonas del sur de Francia. En ARN, CAT y AOR el flujo es más de componente oeste (suroeste en ARN y CAT y oeste en AOR).

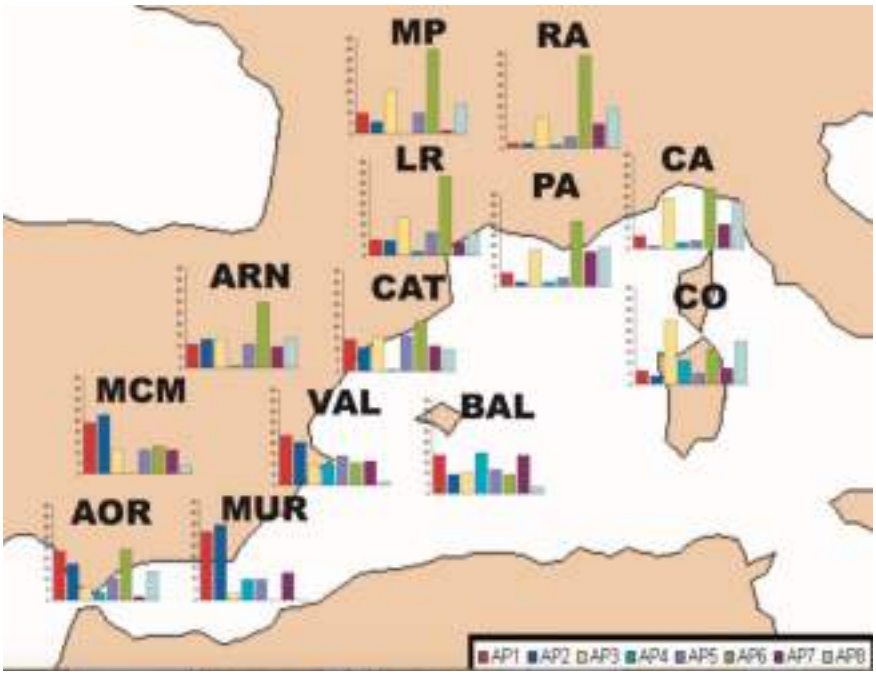


Figura 4. Frecuencia relativa de los distintos tipos de configuración (AP) asociados a lluvia fuerte, en cada región. Fuente: Martínez et al. (2008).

En Córcega el mayor peso relativo corresponde al tipo de configuración AP3, que también tiene importancia relativa en los episodios de lluvia fuerte de muchas de las otras regiones, tanto de Francia, como de España. En altura, la vaguada es tan marcada que llega a traducirse en una baja cerrada en altura, sugiriendo una dana o gota fría, con centro sobre el norte de la Península. La baja en altura se refleja en una depresión en superficie, centrada entre Catalunya e Illes Balears. El flujo en nivel bajo es claramente marítimo y mediterráneo (de componente sur o de componente este) en Córcega, zonas del sur de Francia, Catalunya y Aragón. En cambio, es claramente de tierra (componente oeste y norte) en Murcia, AOR y MCM, quedando la Comunidad Valenciana e Illes Balears en la frontera entre ambos tipos de régimen en nivel bajo.

En Illes Balears la configuración más frecuente, en caso de lluvia fuerte, es AP4, pero a muy poca distancia de AP1 y AP7. En AP4 hay baja cerrada a todos los niveles, alto y bajo, con flujo a nivel bajo en Illes Balears del norte y nordeste. En AP7 la baja no está cerrada en altura, pero sí en nivel bajo, con centro prácticamente sobre Illes Balears.

3.2. Gotas frías e inundaciones mediterráneas

Como queda dicho, los mapas de la figura 3 son promedios, obtenidos de todos los elementos encuadrados en un mismo tipo de configuración. Es importante tener en cuenta que el promediado suaviza. Así, si varios elementos de un mismo tipo de configuración contienen, en altura, bajas cerradas en diferentes posiciones, incluso cercanas, no sería raro que el promedio no diera una baja cerrada, sino una vaguada. Ello podría suceder, por ejemplo, en AP1 y en AP2. En AP3 y en AP4, incluso suavizando por promedio, aparece baja cerrada en altura.

En relación con AP1 y AP2, por ejemplo, cabe preguntarse si lo que aparece en 500 hPa como vaguada es, generalmente, vaguada o es, muchas veces, baja cerrada (a la que llamaríamos dana o gota fría). Dana es, de hecho, el acrónimo de *depresión aislada en niveles altos*. Gota fría es una denominación anterior para la misma estructura, si bien se pueden introducir matizaciones para distinguir entre ambos nombres. La diferencia entre que haya vaguada o dana/gota fría no es, en principio, mucha, pero puede ser significativa. Divergencia en altura y, por tanto, forzamiento

ascendente la hay por delante de una vaguada y por delante de una dana o gota fría. La diferencia entre una vaguada y una dana o gota fría, en este sentido, puede ser solamente de grado de evolución. De hecho, una dana o gota fría procede de una vaguada, que se alarga y/o estrangula, hasta quedar cortado su sector sur de la circulación general. La figura 5 es un ejemplo de evolución de vaguada a dana o gota fría (Jansà, 2017). Puede ocurrir, no obstante, que la gota fría, una vez separada, pierda velocidad de desplazamiento, de modo que como estructura no generadora, pero sí favorecedora de lluvias fuertes se mantenga más tiempo afectando a una misma región, con lo que las cantidades acumuladas de precipitación pueden aumentar.

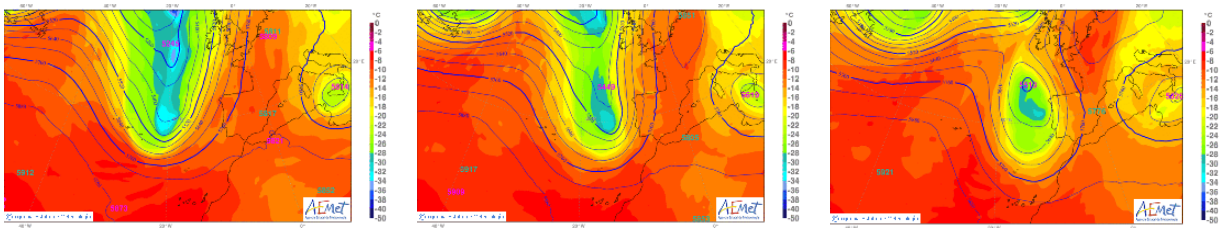


Figura 5. Formación de una gota fría (o dana) por estrangulamiento y corte de una vaguada. Mapas de altura geopotencial y temperatura en 500 hPa, de ECMWF/ AEMET, válidos día 30 de octubre de 2015, a 12 UTC (izquierda), y día 31, a 00 UTC (centro) y a 12 UTC (derecha). Fuente: AEMET, www.aemet.es (Jansà, 2017).

En cualquier caso, mucha gente asocia las inundaciones mediterráneas con las gotas frías o danas. Pudo contribuir a esa asociación el hecho de que un informe del entonces Instituto Nacional de Meteorología (actual AEMET) achacara claramente las lluvias causantes del gran desastre de la presa de Tous a la presencia de una gota fría (García-Dana et al., 1982). Ya hemos visto que, con la aproximación de Martínez et al. (2008), basada en tipos de circulación, no es fácil discriminar hasta qué punto lluvia fuerte mediterránea y presencia de gota fría van juntos. Conviene considerar otras aproximaciones para tratar de discriminar.

Llasat (1991) analizó estadísticamente la presencia de gotas frías en el entorno de la Península Ibérica, su distribución estacional y su posible relación con las inundaciones de Catalunya y Comunidad Valenciana. La conclusión más clara que obtuvo es que no hay una relación biunívoca entre gota fría e inundación rápida en las regiones indicadas. Para empezar, gotas frías hay muchas: según el estudio de Llasat (1991), 77 gotas frías se formaron en diez años sobre el territorio de la Península Ibérica e Illes Balears. Son casi ocho por año; no hay tantas inundaciones importantes en el Mediterráneo español. Además, la estacionalidad de las gotas frías poco tiene que ver con la de las inundaciones mediterráneas: la máxima frecuencia de gotas frías se da en primavera (38%), mientras que en otoño –que es, con mucho, cuando hay más inundaciones- sólo se genera el 19% de las gotas frías. De los análisis de Llasat (1991) se deduce que, aún en los casos en que la gota fría pueda desempeñar un papel significativo en la génesis de las lluvias fuertes mediterráneas, casi nunca la lluvia más intensa ocurre bajo la gota fría, sino que está desplazada, hacia el este y nordeste, coincidiendo con la zona donde se supone que la gota fría crea divergencia en altura y fuerza movimiento ascendente. Considerando sólo la zona peninsular, la mayor frecuencia de centros de gota fría corresponde al sector suroccidental, que no es mediterráneo. Llasat (1991), para terminar, examina 17 casos seleccionados de inundación repentina mediterránea y sólo atribuye clara acción de una gota fría cercana en 5 de ellos; serían sólo el 29% de los casos de inundación importante.

El resultado anterior de Llasat (1991) choca un tanto con los resultados obtenidos por Armengot (2002). Armengot (2002), estudiando 131 casos de precipitación superior a 100 mm/ 24 h, en la Comunidad Valenciana exclusivamente, encuentra 117 casos en los que existe gota fría en principio relacionable, con centro en las posiciones indicadas en la figura 6. Así que en el 89% de los casos de lluvia fuerte sí podría haber relación entre lluvia intensa en la Comunidad Valenciana y gota fría.

Un resultado de Armengot (2002) claramente coincidente con Llasat (1991) es que la mayoría de centros de gotas frías presuntamente relacionables con lluvia fuerte en la Comunidad Valenciana están situadas al SW de esta región, es decir, la Comunidad Valenciana se encuentra en el sector nororiental de la gota fría, no bajo su centro.

En los 14 casos de lluvia fuerte en los que no hay gota fría, lo que sí puede haber en altura es vaguada, es decir, configuración depresionaria abierta. Hay que añadir que los casos en los que la localización del centro de la gota fría hace creíble una relación directa entre lluvia intensa y gota fría se reducen a 89, es decir, el 68%. Los otros casos son aquellos en los que la gota fría está demasiado lejos o muy inadecuadamente localizada (Armengot, 2002).

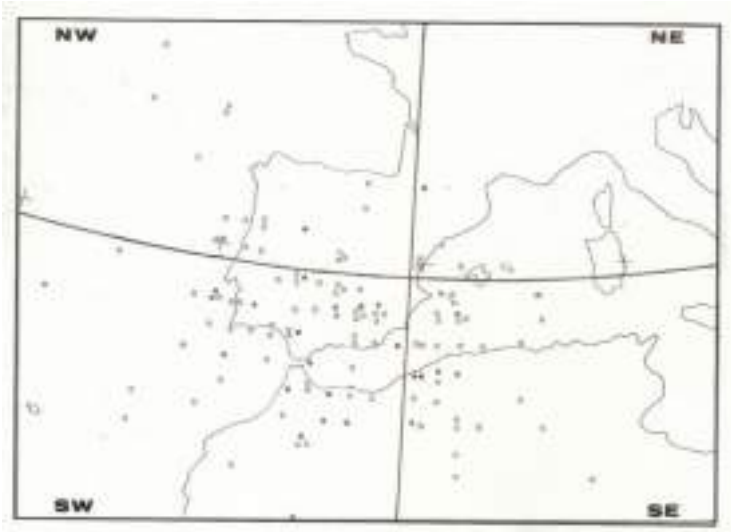


Figura 6. Localización de 117 centros de gotas frías simultáneas a 131 episodios de precipitación superior a 100 mm/ 24 h en la Comunidad Valenciana. Los puntos negros (llenos) se corresponden con precipitaciones superiores a 200 mm/ 24 h. Algunas gotas frías están inadecuadamente situadas como que se pueda pensar que han tenido relación directa con un episodio de lluvia intensa. Fuente: Armengot, 2002.

Los criterios considerados por Llasat (1991) y Armengot (2002) para aceptar la existencia de una posible relación directa entre lluvia intensa y presencia de una gota fría pueden divergir sensiblemente, dado que son subjetivos. Ello puede explicar parte de los discrepantes resultados, 29% y 68% de posible relación, en Llasat (1991) y Armengot (2002), respectivamente. Pero parte de la discrepancia puede deberse al territorio considerado. Llasat (1991) se refiere a Catalunya y Comunidad Valenciana, mientras Armengot sólo considera la Comunidad Valencia. En la Comunidad Valenciana muchos episodios de lluvias fuerte están asociados a las configuraciones meteorológicas macroescalares llamadas AP1 y AP2, compatibles con la presencia cercana de gotas frías, aunque éstas no aparezcan explícitamente representadas en correspondientes los mapas medios de 500 hPa, por la suavización que supone el promediado. En Catalunya, en cambio, las configuraciones más frecuentemente asociadas a lluvia fuerte son las de tipo AP6, difícilmente compatibles con gota fría (figura 3; Martínez et al., 2008). Además, por su propio mecanismo de formación, las gotas frías se crean más fácilmente al sur que al norte del paralelo 40º, de modo que es más fácil que quede cerca de ellas y hacia su parte nororiental la Comunidad Valenciana que Catalunya. En conclusión, aunque la gota fría o dana es una configuración macroescalar que puede actuar como factor favorecedor de las lluvias fuertes mediterráneas, sobre todo en la Comunidad Valenciana, no es causa ni necesaria, ni suficiente.

4. ACCIÓN DE CENTROS CICLÓNICOS SUPERFICIALES

En la inmensa mayoría de episodios de lluvia fuerte en el Mediterráneo occidental, al menos en sus sectores español y francés, simultáneamente a la lluvia fuerte aparece un centro ciclónico (o baja) superficial y cercano, que puede ser pequeño, débil y de poco espesor, pero que parece jugar un papel importante en el aprovisionamiento de agua y en el desencadenamiento de la lluvia fuerte. El papel específico de ese tipo de centro ciclónico es el de organizador del flujo aéreo, movilizando la masa de aire mediterránea (que es cálida y húmeda, particularmente en otoño) y llevándola al lugar donde la lluvia fuerte arranca o se sostiene. Esa corriente de aire mediterráneo, cálido y húmedo, superficial y de poco espesor, alimenta la lluvia fuerte, reemplazando el agua separada por la precipitación, que suponemos es intensa y continuada, al menos durante un tiempo (Doswell et al., 1996). El flujo de aire mediterráneo favorece, además, la inestabilización vertical del aire, al calentar y humidificar la base de la columna aérea. La inestabilización será más efectiva y rápida si el flujo aéreo conduce el aire mediterráneo bajo aire relativamente frío en altura. En el lugar donde la corriente mediterránea encuentre algún obstáculo o frenado, terrestre (como montañas) o aéreo (como convergencia con otro flujo) se producirá un ascenso forzado, de escala pequeña, pero de una magnitud que puede ser importante. En función de la velocidad del viento incidente y de la importancia del obstáculo, el ascenso puede ser del orden de algunos metros por segundo. Además de intensificarse de un modo importante la posible lluvia preexistente, será fácil que se desencadene la convección, si las condiciones de inestabilidad y/o inestabilización son suficientes. El planteamiento anterior se resume en el dibujo de la figura 7, que puede considerarse como un modelo conceptual sobre la interacción entre centro ciclónico superficial y lluvia fuerte mediterránea.

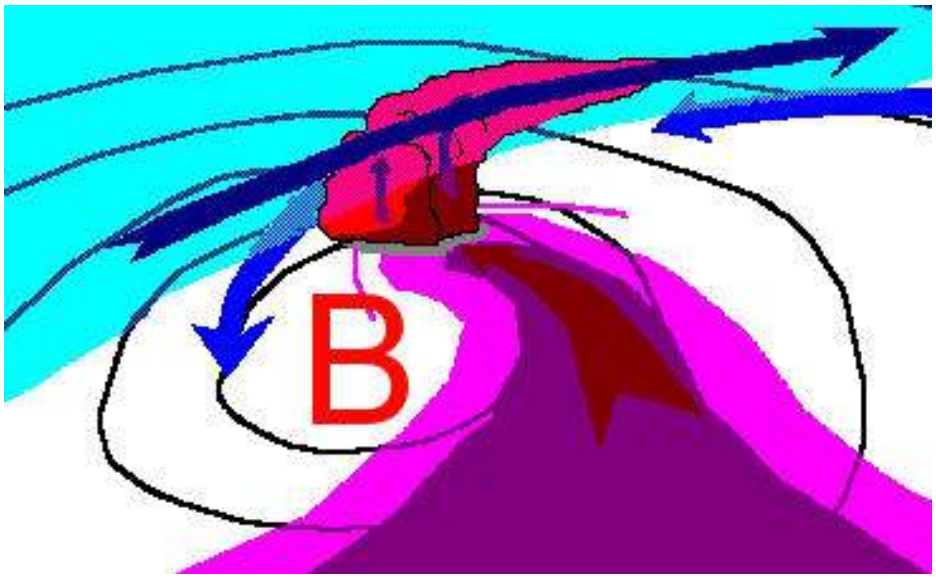


Figura 7. Modelo conceptual de la interacción entre centro ciclónico superficial (B en la figura) y l
mediterránea. Fuente: Jansà (1997).

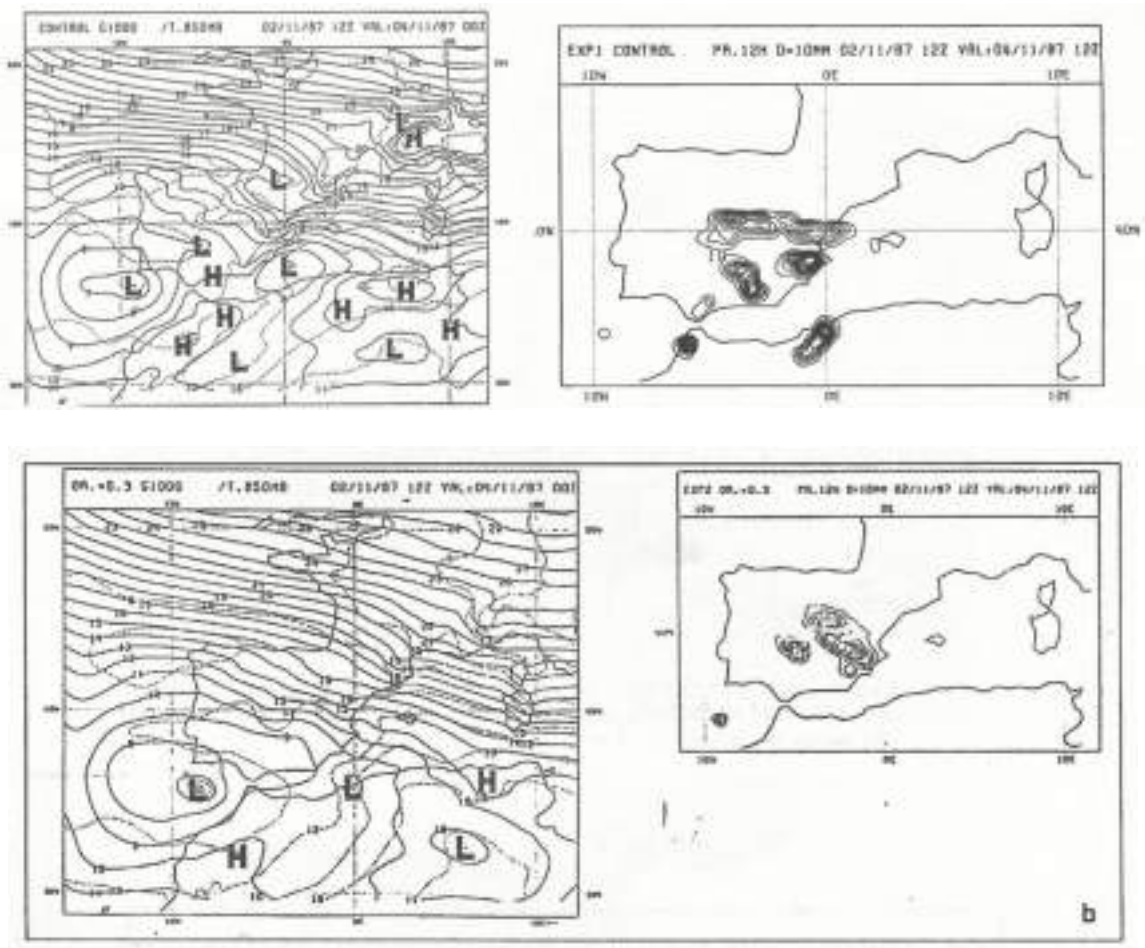


Figura 8. Experimentos numéricos sobre el caso de Gandía y Oliva, 1987. Arriba, experimento de control, mostrando, en el mapa de la izquierda, una baja en el Mediterráneo (L), entre el SE de la Península y el N de África. Al norte de la baja se organiza un potente y limitado flujo del ENE, en cuyo extremo descarga una intensa y localizada lluvia, relativamente bien captada por el modelo (mapa de la derecha). Abajo, experimento con orografía suavizada, resultando dilución, debilitamiento y desorganización de la baja, del flujo de levante y del núcleo principal de lluvia. Fuente: Jansà et al. (1991).

La baja organiza la corriente mediterránea, cálida y húmeda, limitándola horizontalmente, restringiéndola a un cauce relativamente estrecho, que es la zona donde el gradiente de presión y, por consiguiente, el viento, resultan máximos. Experimentos mediante modelos numéricos de predicción meteorológica, realizados entre 1989 y 1991, algunos referidos al episodio de lluvias extraordinarias del 3-4 de noviembre de 1987, en Gandía y Oliva (Jansà et al., 1991; figura 8), muestran con claridad ese efecto: cuando la simulación numérica reproduce la baja mediterránea de un modo aceptablemente realista, su presencia organiza, limita, confina el flujo de aire cálido y húmedo mediterráneo, concentrando sus funciones de alimentación e inestabilización a un área relativamente pequeña, donde la lluvia resulta muy intensa y localizada. Cuando la baja se desdibuja, en simulaciones en las que el relieve es artificialmente suavizado, la corriente mediterránea se hace más extensa, desorganizada, desconcentrada, diluida, y también la lluvia se debilita y extiende. Dicho sea de paso, los experimentos descritos anteriormente demuestran que la baja entre Península y África tiene un origen, al menos parcialmente, orográfico.

No es infrecuente que la corriente de aire mediterráneo, cálido y húmedo, esté limitado, no sólo horizontalmente, sino también verticalmente, por una inversión térmica a relativamente poca altitud.

La inversión puede ser resultado de una subsidencia anticiclónica lejana o de la advección de aire africano por encima del aire mediterráneo, que, al menos en otoño, suele ser menos cálido que el africano. Esa limitación vertical contribuye a la concentración de la lluvia fuerte en una zona relativamente pequeña, única en la que se produce ascenso brusco (Llasat, 1991).

Jansà et al. (2001) plantearon, por vía estadística, la simultaneidad cercana entre baja y lluvia fuerte mediterránea. Para ello, para cada uno de los casos de lluvia fuerte considerados en la tabla 1, agrupados por regiones amplias, se investigó, en una base de datos de ciclones, que incluía centros ciclónicos muy débiles, la presencia, o no, el mismo día de la lluvia fuerte, de una baja en superficie, de cualquier tamaño e intensidad, pero con centro situado a una distancia máxima del centro de la región con lluvia de 600 km. En caso de encontrar varios centros ciclónicos dentro de ese radio se tomó el más cercano a la zona de lluvia fuerte.

Región	*Casos de lluvia fuerte*	*Incluidas bajas muy débiles (1)*		*Excluidas bajas muy débiles (2)*	
		% de casos con baja cerca	*% de fechas aleatorias con baja cerca*	*% de casos con baja cerca*	*% de fechas aleatorias con baja cerca*
Sur de Francia/Este	120	91	56	70	51
Sur de Francia/Oeste	195	90	59	75	52
Córcega	49	94	53	81	52
Catalunya	110	95	64	65	54
València y Murcia	145	99	70	57	57
Andalucía oriental	29	79	46	--	--
Illes Balears	106	99	69	80	60

Tabla 2. Frecuencia, por regiones, de baja cercana simultánea a los casos de lluvia fuerte y en un conjunto aleatorio de fechas. Fuente: (1) Jansà et al., 2001; (2) Campins et al., 2002.

Las regiones amplias consideradas son Sur de Francia/Este, Sur de Francia/Oeste, Córcega, Catalunya, València y Murcia, Andalucía oriental y Illes Balears. El número de casos asociados a cada región puede verse en la tabla 2, segunda columna. Nótese que los casos se habían inicialmente asociado a entidades territoriales pequeñas (ver tabla 1); si en una misma fecha ha habido lluvia fuerte en N unidades territoriales pequeñas encuadradas en una misma región amplia, ese caso estará contabilizado N veces, no una, en la correspondiente región amplia, de modo que los números de la segunda columna de la tabla 2 tienen poca significación climatológica directa. En la tabla 2, tercera columna, se incluye el tanto por cien de casos en los que se ha encontrado baja superficial (de cualquier intensidad) dentro del radio de 600 km. Los porcentajes son muy altos y se podría pensar que lo normal es que haya bajas cerca de la zona de lluvia fuerte, sin que ello implique relación entre unas y otras. Para ayudar a discriminar, la cuarta columna da el porcentaje de fechas aleatorias, para cada región, con lluvia o sin ella, en las que se encuentra una baja cerca de dicha región. Se ve que hay una disminución sustancial de frecuencia respecto de la tercera columna, lo cual indica que no es casualidad el alto porcentaje de veces que, habiendo lluvia fuerte en una región, hay un centro ciclónico cercano.

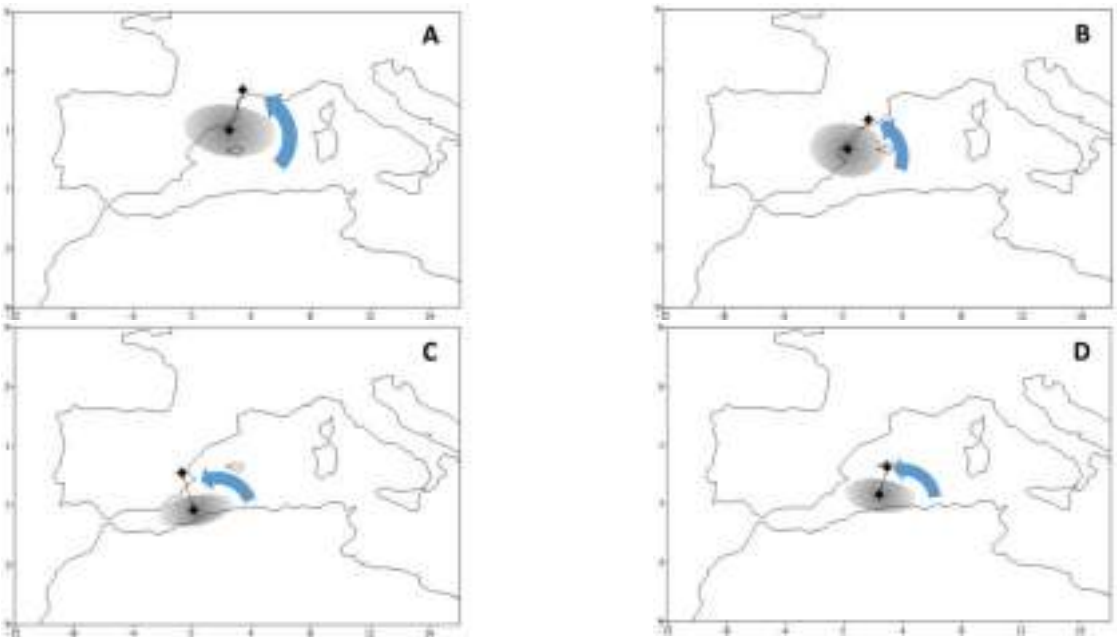


Figura 9. Localización preferente (elipse sombreada) de las bajas simultáneas a lluvia intensa en diferentes regiones: (A) Sur de Francia (oeste), (B) Catalunya, (C) València y Murcia, (D) Illes Balears. Las flechas azules indican el posible eje del flujo mediterráneo organizado por la baja. Fuente: adaptado de Jansà et al. (2001).

En la figura 9 se representa, mediante una elipse sombreada, la posición más frecuente de la baja superficial cercana encontrada en simultaneidad con lluvia fuerte en las diferentes regiones (según Jansà et al., 2001). Las flechas azules indican el eje del flujo de aire mediterráneo que la baja podría tender a organizar. Son, en general, localizaciones favorables a una organización apropiada del flujo mediterráneo para la lluvia fuerte, de acuerdo con el modelo conceptual de la figura 7; ello refuerza la idea de que la presencia de baja cercana a una zona de lluvia fuerte no es pura casualidad.

Muchos de los centros ciclónicos encontrados en simultaneidad con lluvia fuerte en las regiones mediterráneas, aunque pudieron ser incluidos en la base de datos de ciclones usada en Jansà et al. (2001) (Tabla 2, columnas 3 y 4 y figura 9), son demasiado débiles y/o demasiado pequeños como para que puedan ser detectados en análisis objetivos de poca resolución o suavizados. Usando análisis operativos suavizados del modelo HIRLAM/INM, que no podían captar los ciclones más débiles, Campins et al. (2002) revisitaron el trabajo anterior, encontrando, lógicamente, frecuencias menores de simultaneidad entre lluvia fuerte y presencia ciclónica cercana (columnas 5 y 6 de la tabla 2). Véase que la mayor pérdida de frecuencia entre las columnas 3 y 5 se produce en relación a la región compuesta por la Comunidad Valenciana y Murcia, mientras que la menor reducción se da para Illes Balears y Córcega.

Muchos de los centros ciclónicos cercanos, simultáneos a lluvia fuerte en València/Murcia, son muy débiles y, por tanto, difícilmente detectables. Por ello no es raro que no aparezca baja cerrada en nivel bajo en los tipos de configuración AP1 y AP2 (Martínez et al., 2008; apartado 3.1; figura 3), los más relacionados con lluvias fuertes valencianas. Tampoco es raro que se haya considerado poco la presencia de centros ciclónicos débiles al estudiar las inundaciones repentinas valencianas, las segundas más frecuentes y graves del Mediterráneo occidental, después de las francesas. Se ha hablado mucho de gota fría cercana y de flujo mediterráneo de componente este, pero poco de centro ciclónico superficial.

Que los valores de las columnas 5 y 6 para València/Murcia sean iguales puede hacer pensar que, descartadas las bajas más débiles, la proximidad de una baja superficial no tan débil sea puramente aleatoria. Se ve que no es así cuando se analizan localizaciones: las bajas correspondientes a la columna 5 están localizadas de un modo semejante al que se muestra en la figura 9-C; no así las correspondientes a la columna 6.

Algo parecido a lo que pasa con València/Murcia, aunque no tan claramente, aparece en relación con las lluvias fuertes del sur de Francia y de Catalunya: llega a ser más clara la presencia de flujo mediterráneo del sur, sudeste y este que la presencia de centros ciclónicos superficiales cercanos, aunque esa presencia pueda estar organizando, o ayudando a organizar el flujo.

En cambio, en Illes Balears (y Córcega) al eliminar las bajas más débiles no se elimina mucha frecuencia de simultaneidad entre bajas y lluvias fuertes: por lo que atañe a esas regiones las bajas relacionables con lluvia fuerte son más frecuentemente moderadas o intensas que débiles o muy débiles: no es raro que los grandes tipos de configuración (Martínez et al., 2008; apartado 3.1; figura 3) sí dibujen bajas cerradas cerca de Illes Balears, cuando hay lluvia fuerte en el archipiélago. Eliminados los centros ciclónicos más débiles, las bajas asociadas a lluvia fuerte en Illes Balears modifican un poco su localización más frecuente, acercándose a la zona de lluvia fuerte (Campins et al., 2006).

En realidad, no es difícil pensar que cerca del centro de una baja intensa y profunda hay más facilidad para que se produzca lluvia fuerte que si la baja es débil; en efecto, la propia baja, si es intensa, aparte de la acción indirecta hasta aquí apuntada, atrae aire desde los alrededores, generando un vigoroso flujo que se hace convergente y ascendente cerca del centro de la depresión. La velocidad del ascenso y el aporte de humedad pueden ser suficientes para justificar una intensidad de lluvia importante, reforzada esa intensidad, evidentemente, si a la dinámica de la baja se añade ascenso orográfico y/o convección profunda.

Pero incluso sin convección profunda o con convección profunda sólo ocasional, las acumulaciones de lluvia pueden ser muy importantes. La figura 10 muestra una baja muy intensa, situada junto a las Illes Balears, entre el 10 y el 11 de noviembre de 2001, y que, al parecer con muy poca convección, arrojó cantidades de precipitación superiores a los 300 mm/ 48 h, en puntos de la Serra de Tramuntana de Mallorca, con inundaciones en áreas del norte de la isla (Genovés y Jansà, 2003).

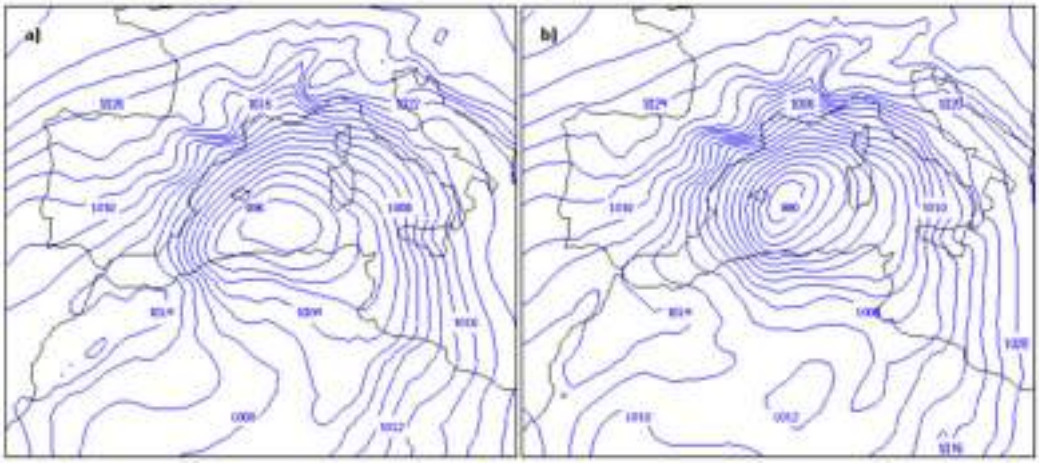


Figura 10. Intenso centro ciclónico junto a Illes Balears. Análisis de presión al nivel del mar HIRLAM-INM, (a) 11-nov-2001, a 00 UTC, (b) 11-nov-2001, a 06 UTC.

Las depresiones atmosféricas intensas no son raras en el Mediterráneo occidental, aunque son, evidentemente, mucho menos frecuentes que las débiles o moderadas. De entre las depresiones intensas, la mayor frecuencia corresponde a las de la zona de golfo de Génova y Mar Ligur, que, en cuanto a lluvias fuertes, pueden contribuir mucho a las que ocurren en Córcega y áreas del norte de Italia, Croacia o Eslovenia, pero poco a las del Mediterráneo francés o español.

Menos frecuentes, pero más eficaces para los litorales mediterráneos español y francés son las depresiones nacidas entre la costa africana y la Península (como la de 10-11 de noviembre de 2001, ya citada) o en la zona del Mar Balear. Un ejemplo adicional es la llamada borrasca *Gloria*, formada en enero de 2020 y que, a pesar de lo moderado de la presión central, resultó muy intensa en cuanto a vientos, generándose un gran temporal marítimo, ya que el gradiente de presión era muy fuerte, por la presencia de un potente anticiclón al norte del Mediterráneo (figura 11). Los fuertes vientos provocaron fuertes convergencias y ascensos, que quizás fueran causa primera de que las lluvias fueran muy copiosas (más de 200 mm en la Serra de Tramuntana de Mallorca y hasta 433 mm en Barx, València, por ejemplo), aunque la convección pudo ser, también, una contribución importante, aun siendo los rayos relativamente escasos y de localización más bien marítima, según indica el mapa de rayos incluido en la figura 10, derecha. Si hay rayos hay convección profunda, de modo que los rayos son un buen indicador de convección, en ese sentido.



Figura 11. Borrasca Gloria. Izquierda: presión al nivel del mar, en Pa, día 19-ene-2020, a 00 UTC, del *reanálisis NCEP/NCAR, obtenido de NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, USA.* Fuente: https://psl.noaa.gov/. Derecha: rayos desde el día 19-ene-2020, a 00 UTC, al día 20, a 12 UTC. Fuente: *Blitzortung.org, www.lightningmaps.org.*

5. CONVECCION PROFUNDA Y ORGANIZADA

La figura 12 corresponde a una situación que podría ser catalogada como básicamente de gota fría, y que se prolongó en el tiempo durante varios días, en torno al 12 de septiembre de 2019, causando lluvias muy cuantiosas en distintas comarcas mediterráneas españolas, en distintos momentos, incluyendo Orihuela, por ejemplo, donde hubo inundaciones el día 12, con 150 mm de precipitación en pocas horas.

Comparando los mapas de rayos de las figuras 11 y 12 es fácil concluir que la situación de septiembre de 2019 fue mucho más convectiva que la de enero de 2020. En este caso, la convección profunda y organizada es clave, aunque también han intervenido otros factores, como la propia y clara gota fría, o la baja mediterránea, que, en esta ocasión no es muy aparatosa (ni siquiera aparecen isobaras cerradas dentro del Mediterráneo), aun siendo una configuración abierta, organiza eficientemente una fuerte advección de aire mediterráneo sobre las Illes Balears y sobre la Comunidad Valenciana y la región de Murcia.

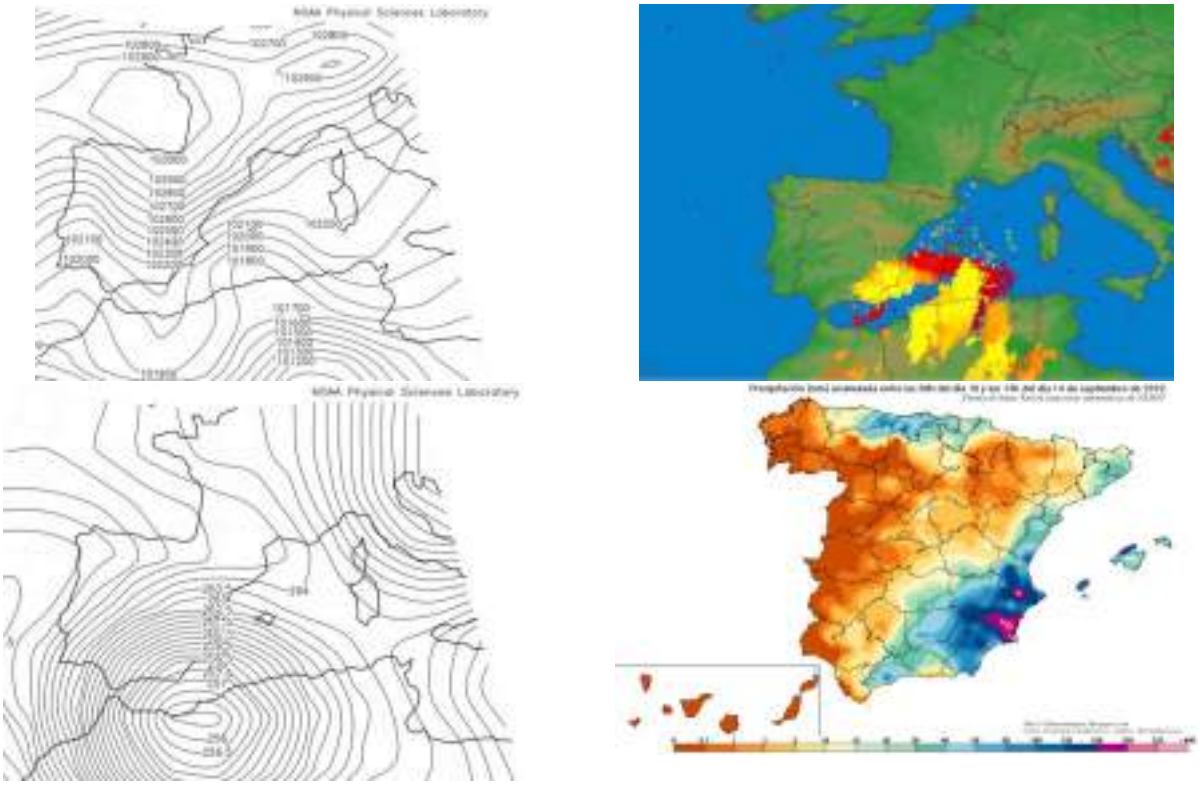


Figura 12. Situación de gota fría del 10 al 14 de septiembre de 2019.
Izquierda: análisis día 12, a 00 UTC; arriba, presión a nivel del mar (en Pa), abajo, temperatura a 500 hPa, en ºK; ambos mapas procedentes del *reanálisis NCEP/NCAR, obtenidos de NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, USA. Fuente: https://psl.noaa.gov/.* Derecha arriba: rayos registrados durante el día 12. Fuente: *Blitzortung.org,* vía *www.lightningmaps.org*. Derecha abajo: precipitaciones recogidas en estaciones automáticas, entre las 0 h de día 10 y las 13 h de día 14. Fuente: AEMET, www.aemet.es (2019).

La cuestión que se plantea ahora es hasta qué punto es necesaria (y/o suficiente) la convección profunda, organizada o no, para que la lluvia sea suficientemente intensa como para provocar inundaciones repentinas. Teniendo en cuenta lo difícil que es que el ascenso meteorológico de gran escala no convectivo, incluso reforzado por la orografía y por la convergencia a escala reducida, baste para dar intensidades de lluvia suficientes para provocar una inundación, afirmaríamos, a priori, que las lluvias muy intensas, aunque no son imposibles sin convección, son bastante improbables. La convección puede ser un factor clave.

Una primera orientación sobre esta cuestión nos la puede dar la climatología de rayos. Los mapas de la figura 13 (Núñez et al., 2019) nos dan la densidad de descargas a tierra por km^2, por estaciones del año. En verano hay zonas de montaña (Pirineos, sierras catalanas, Maestrazgo y otras sierras del Sistema Ibérico) con alta densidad de descargas, pero una amplia zona, extensa, marítima y costera, con densidades continuamente superiores a 1 descarga/km^2 sólo se dan en otoño, en el Mediterráneo, coincidiendo la zona y la estación con más rayos con la zona y la estación con más lluvias de gran intensidad. No parece casualidad; será fácil que las lluvias intensas mediterráneas, particularmente las otoñales, vayan acompañadas de tormenta. Ello ayuda a garantizar la intensidad suficiente de la lluvia.

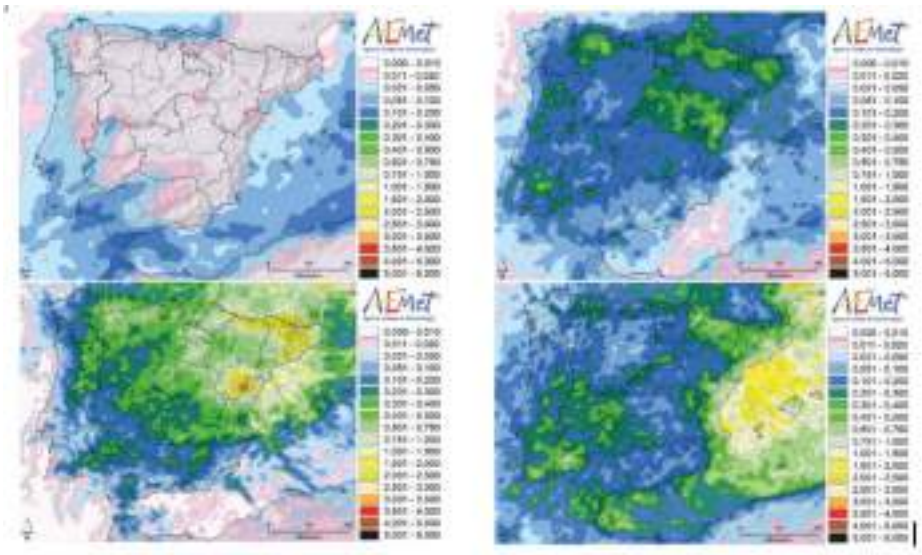


Figura 13. Mapas estacionales de densidad media de descargas eléctricas, por km^2 y estación. De izquierda a derecha y de arriba abajo, invierno, primavera, verano y otoño. Fuente: Núñez et al. (2019) y www.aemet.es.

Una célula o núcleo convectivo simple, individual, tiene una vida corta, de 30 a 40 minutos y una dimensión muy limitada, de escasos km lineales, de modo que, aunque las células o núcleos convectivos aislados, solos o embebidos en masas nubosas no convectivas, puedan producir intensificaciones temporales importantes de la lluvia, además de rayos, ello no basta para que la precipitación total acumulada sea suficientemente copiosa como para producir una inundación. Se necesita tiempo y espacio. Los sistemas convectivos organizados, resultado de la asociación e interacción de numerosas células convectivas individuales entre sí, pueden tener varias horas de vida, incluso alguna decena de horas, con extensiones considerables. Se habla de sistemas convectivos de mesoscala cuando la agrupación convectiva tiene más de 100 km en alguna de sus dimensiones lineales. Para alcanzar las máximas copiosidades ha de ser óptimo un sistema convectivo de mesoscala, que, además, se estacione en alguna zona, o avance sobre ella muy lentamente (figura 14).

Es así que, durante un tiempo, como alternativa a relacionar las lluvias intensas mediterráneas con gotas frías, con flujos marítimos canalizados, con ascensos orográficos, con convergencias o con depresiones superficiales, fueron los sistemas convectivos de mesoscala (SCM) estacionarios o cuasi-estacionarios los que se plantearon como los factores clave, los más eficaces para la generación de inundaciones mediterráneas repentinas. En verdad, los distintos elementos considerados no son excluyentes, unos con otros, sino que pueden sumar acciones.

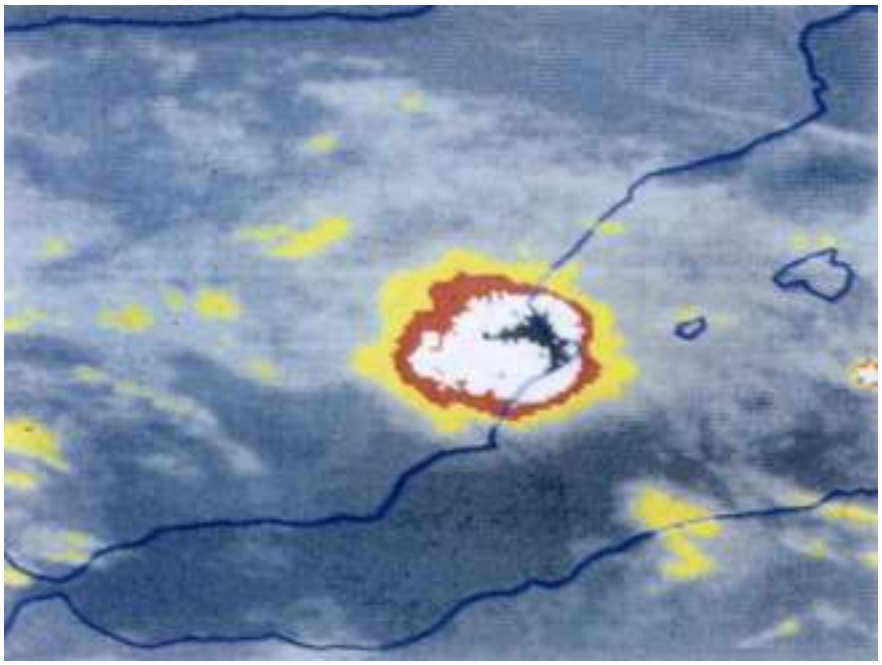


Figura 14. Sistema convectivo de mesoscala cuasi-estacionario, directamente responsable de la lluvia récord de Oliva-Gandía (más de 800 mm en 24 h). Imagen Meteosat, realzada en falso color, según la temperatura de brillo; rojo: T< -42ºC, blanco: T<-54ºC, negro: T<-64ºC. Fuente: Riosalido et al. (1988).

Una serie de trabajos relacionan directamente los SCM con episodios históricos de inundaciones mediterráneas repentinas. A modo de ejemplos, se pueden citar Rivera y Riosalido (1986), Riosalido et al. (1988), Riosalido et al. (1998), Ramis et al. (1994), Senesi et al. (1996). Riosalido et al. (1998) realizaron un valioso trabajo sistemático de localización y catalogación de SCM en la zona de la Península Ibérica y Mediterráneo occidental.

Jansà et al. (2001) cruzaron las bases de datos de lluvias fuertes mediterráneas y de centros ciclónicos mediterráneos con la base de datos de Riosalido et al. (1998) para investigar las posibles múltiples relaciones existentes entre SCM y lluvias fuertes y entre SCM y centros ciclónicos. Lamentablemente sólo hay datos comunes entre las tres bases de datos en tres otoños, los de 1992, 1993 y 1994, que suman 352 casos de lluvia fuerte (más de 60 mm/ 24 h) en la zona mediterránea hispano-francesa. Sólo en 19 de esos 352 casos ha habido algún SCM, con centro a menos de 150 km del lugar de la lluvia fuerte, durante el día en el cual se ha producido esa precipitación. Así que en sólo un 5,4% de los casos de lluvia fuerte hay un SCM relacionable. En la gran mayoría de los casos las causas de la lluvia fuerte no incluyen la presencia suficientemente cercana de un SCM. Ello no obstante, el porcentaje sube al 12,9% si sólo consideramos los casos de más de 100 mm/ 24 h, que son 101 casos en el periodo común. Revisando los casos más extremos (más de 200 mm/ 24 h), parece que los porcentajes crecerían más. Procediendo a la inversa, si se revisan los casos en los que ha tocado tierra algún SCM en alguna de las unidades territoriales consideradas, en más de la mitad de ellos ha habido lluvia fuerte en la o las correspondientes unidades territoriales.

6. CONCLUSIONES

En los litorales mediterráneos, el español y el francés, en particular, se producen con relativa frecuencia precipitaciones de intensidad y copiosidad suficientes como para generar inundaciones repentinas. Hay una serie de factores que explican esa relativa facilidad o que aparecen como causa de los hechos. Por una parte, ese tipo de episodios es muy estacional (otoñal), siendo una razón

primera la acumulación de calor y humedad en la atmósfera mediterránea baja, debido al calentamiento del mar, tras el típico largo y seco verano mediterráneo. No es suficiente disponer de energía, contenida en el mar y en la capa atmosférica baja, ya que ésta sólo se libera cuando vienen a concurrir factores meteorológicos favorables, propiciadores.

Vaguadas en nivel alto o gotas frías o danas cercanas se observan muy frecuentemente en asociación con episodios de lluvia fuerte mediterránea; también, circulaciones ciclónicas, con o sin centro ciclónico separado. El flujo superficial de gran escala es de procedencia marítima (componente este o componente sur en los litorales español y francés). La presencia de centros ciclónicos separados, cercanos a la zona de lluvia fuerte, aunque sean pequeños, someros o débiles, es el factor que más veces se ve asociado a los episodios de mucha lluvia, en un 90% de todos ellos. Presumiblemente, el centro ciclónico cercano organiza flujos limitados, del este o del sur, que acaban incidiendo contra montañas o convergencias, generándose entonces fuertes ascensos mesoscalares, que son otro importante factor de la lluvia fuerte.

En muchos de los casos, la existencia de suficiente inestabilidad vertical, como para que se pueda iniciar convección profunda, es una condición muy favorable, para no decir necesaria, para que ocurran grandes lluvias fuertes mediterráneas. En bastantes de esos casos, particularmente en los más importantes, la convección, no es en células simples, sino que está organizada, formando sistemas convectivos de mesoscala. Si ésos son estacionarios o de movimiento lento, la efectividad es máxima.

Mar caliente, circulación ciclónica a gran escala, en niveles altos y bajos, centro ciclónico superficial cercano, ascensos orográficos o por convergencia, convección en general y convección organizada no son factores excluyentes entre sí, sino que, muchas veces, se combinan, sumándose los efectos.

REFERENCIAS

- Armengot, R. (2002). *Las lluvias intensas en la Comunidad Valenciana*. Serie A, núm. 152, 263 pp. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Campins, J., Jansà, A., Genovés, A. y Picornell, M. A. (2002). Heavy rain and cyclone in the Western Mediterranean. *EGS XXVII General Assembly, Nice, 21-26 April 2002.* (No publicado: copia personal)
- Campins, J., Jansà, A. y Genovés, A. (2006). Heavy rain and strong wind events and ciclones in the Balearics. *Advances in Geosciences*, 7, 73–77.
- Chazarra Bernabé, A., Flórez García, E., Peraza Sánchez, B., Tohá Rebull, T., Lorenzo Mariño, B., Criado Pinto, E., Moreno García, J. V., Romero Fresneda, R. y Botey Fullat, R. (2018). *Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016)*. Ministerio para la Transición Ecológica, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/MapasclimaticosdeEspana19812010/MapasclimaticosdeEspana19812010.pdf
- Doswell III, C. A., Brooks, H. E. and Maddox, R. A. (1996). Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. *Weather and Forecasting,* 11, 560-581
- García-Dana, F., Font-Blaco, R. y Rivera-Pérez, A. (1982). *Situación atmosférica causante de lluvias torrenciales durante los días 19 al 21 de octubre de 1982 en el Levante español,* Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Genovés, A. y Jansà, A. (2003). Diabatic processes contribution to the November 2001 storm. En: A. Jansà, R. Romero (Eds.), *Mediterranean Storms – 4th Plinius Conference.*
- Jansà Guardiola, J. M. (1959). La masa de aire mediterránea. *Revista de Geofísica,* 18, 35-50.
- Jansà Guardiola, J. M. (1966). Meteorología del Mediterráneo Occidental, *III Ciclo de*

conferencias desarrollado en el Instituto Nacional de Meteorología, durante el año 1964. Serie A-43, II, 1-35. Servicio Meteorológico Nacional, Madrid.

- Jansà, A., García-Moya, J. A. y Rodríguez, E. (1991). Numerical experiments on heavy rain and Mediterranean cyclones. The 3-4 Nov 1987 and 4-6 Sep 1989 cases. *Report of the Fourth Session of the Steering Group on Mediterrnanean Cyclones Study Project,* Technical Document 420, 37-47. World Meteorological Organisation.
- Jansà, A. (1997). A general view about Mediterranean meteorology: cyclones and hazardous weather. En: *INM/WMO International Symposium on cyclones and hazardous weather in the Mediterranean, Palma de Mallorca, Spain, 14-17 April 1997,* 33-44. Ministerio de Medio Ambiente y Universitat de les Illes Balears.
- Jansà, A., Genovés, A., Picornell, M. A., Campins, J., Riosalido, R. and Carretero, O. (2001). Western Mediterranean cyclones and heavy rain, Part 2: Statistical approach, *Meteorological Applications*, 8 (1), 43–56.
- Jansà, A. (2014). *El clima de les Illes Balears.* Lleonard Muntaner Editor, Palma.
- Jansà, A., Alpert, P., Arbogast, P., Buzzi, A., Ivancan-Picek, B., Kotroni, V., Llasat, M. C., Ramis, C., Richard, E., Romero, R. y Speranza, A. (2014). MEDEX: a general overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1965–1984, https://doi.org/10.5194/nhess-14-1965-2014
- Jansà, A. (2017). Gota freda i depressió atmosférica. Claus de la pluja forta mediterrània. *Mètode*, 95, 16-23.
- Llasat, M. C. (1991). *Gota fría*. Editorial Boixareu Universitaria, Barcelona.
- Llasat, M. C., Marcos, R., Llasat-Botija, M., Gilabert, J., Turco, M. y Quintana-Seguí, P. (2014). Flash flood evolution in North-Western Mediterranean. *Atmospheric Research*, 149, 230-243.
- Martínez, C., Campins, J., Jansà, A. y Genovés, A. (2008). Heavy rain events in the Western Mediterranean: an atmospheric pattern classification. *Advances in Science and Research*, 2, 61-64.
- Núñez, J. A., Riesco, J. y Mora, M. A. (2019). *Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España.* Ministerio de Transición Ecológica, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). *www.aemet.es*
- Ramis, C., Llasat, M. C., Genovés, A. y Jansà, A. (1994). The October 1987 floods in Catalonia: synoptic and mesoscale mechanism. *Meteorological Applications*, 1, 337-350.
- Riosalido, R., Rivera, A. y Martín, F. (1988). Development of a mesoscale convective system in the Spanish Mediterranean area. 7th *Meteosat Scientific User's Meeting*, 375-378, EUMETSAT, Madrid.
- Riosalido, R., Elizaga, F., Carretero, O. y Martín, F. (1998). *Climatología satelitaria de sistemas convectivos mesoscalares en las proximidades de la Península Ibérica: aplicación a la predicción de lluvia torrencial*. Nota Técnica STAP Nº 29, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Rivera, A., y Riosalido, R. (1986). Mediterranean convective systems as viewed by Meteosat. A case study. *6th Meteosat Scientific User's Meeting. Amsterdam 25-27 Nov*., EUM P.01.
- Senesi, S., Bougeault, P., Cheze, J. L., Consentino, P. H. y Thepenier, R. M. (1996). The Vaison-la-Romainw flash flood: mesoscale analysis and predictability issues. *Weather and Forecasting,* 11, 417-442

IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE PREDICCIÓN Y ALERTA DE INUNDACIONES EN GALICIA

Jerónimo Puertas Agudo
ETS Ingeniería de Caminos, C.P., Universidad de A Coruña
jeronimo.puertas@udc.es
https://orcid.org/0000-0001-6502-0799

Luis Cea Gómez
ETS Ingeniería de Caminos, C.P., Universidad de A Coruña
luis.cea@udc.es
https://orcid.org/0000-0002-3920-0478

Ignacio Fraga Cadórniga
ETS Ingeniería de Caminos, C.P., Universidad de A Coruña
ignacio.fraga@udc.es
https://orcid.org/ 0000-0001-5626-7781

Gonzalo Mosqueira Martínez
Augas de Galicia, Xunta de Galicia
gonzalo.mosqueira.martinez@xunta.gal

Belén Quinteiro Seoane
Augas de Galicia, Xunta de Galicia
belen.quinteiro.seoane@xunta.gal

RESUMEN

En esta ponencia se presenta el proyecto MERLIN, desarrollado por Augas de Galicia y la Universidad de A Coruña y cuyo objetivo inicial es la determinación en tiempo real de zonas potencialmente afectadas por inundaciones a partir de datos meteorológicos. Este proyecto es la evolución del sistema ARTEMIS, operativo desde hace años en Augas de Galicia. Su principal avance es la incorporación de un modelo hidráulico que permite no sólo la estimación de los caudales sino la visualización de las predicciones de superficies inundables en pronósticos de hasta 3 días, incorporando además medidas de incertidumbre derivadas esencialmente de las predicciones meteorológicas. El proyecto ha sido ya implementado a nivel piloto en cinco cuencas de Galicia, y la siguiente fase, ya iniciada, es su aplicación con generalidad a todas las cuencas con riesgo de inundación. Esta implementación general se completará con el fortalecimiento de la red de medición de niveles en áreas potencialmente inundables, que servirá como elemento de calibración del sistema, y con otros factores que vincularán este sistema con la planificación general del riesgo de inundaciones en Galicia.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones generan pérdidas materiales y personales en todo el mundo. El riesgo vinculado a las inundaciones suele ser, según los informes anuales de riesgos de catástrofes, el que más pérdidas genera (quizá no este año, en el que la catástrofe sanitaria COVID-19 tendrá un efecto mucho mayor).

La Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) propone que no existen los desastres naturales: sólo existen amenazas naturales. Los desastres son, según esta fuente, la combinación de esa amenaza con un entorno más o menos vulnerable y un conjunto de decisiones más o menos acertadas.

Cabría incluso cuestionar el carácter natural de la amenaza, si se admite que los extremos climáticos se están viendo alterados por factores de origen antrópico. Desde este punto de vista, las acciones orientadas a limitar los efectos del cambio climático formarían parte de ese conjunto de decisiones, cuyos efectos sólo se percibirán a largo plazo.

En el caso concreto del riesgo de inundaciones, la amenaza se manifiesta en general en forma de lluvias torrenciales, que generan escorrentía superficial y crecidas en los ríos, cuyo efecto es la pérdida por inundación de activos de valor económico o en casos extremos pérdidas humanas. Aceptando el carácter natural de las lluvias, con las salvedades apuntadas, la exposición de esos activos al agua no es natural, y depende de la decisión (consciente o no) de construir infraestructuras urbanas, industriales o agropecuarias en zonas susceptibles de sufrir inundaciones.

La colonización de terrenos limítrofes a los ríos, o la colonización de los propios ríos, es algo generalizado: son terrenos en general llanos, fértiles, agradables para el desarrollo urbanístico, y las inundaciones tienen un comportamiento muy aleatorio y en ocasiones pasan muchos años entre eventos, con lo que la memoria histórica sobre el efecto de la anterior crecida en una zona, si la hubo, es en general difuso y la ciudadanía y los responsables de los desarrollos urbanísticos o de la promoción de infraestructuras tienden a infravalorar el riesgo.

La situación actual es que la práctica totalidad de los ríos españoles están colonizados con infraestructuras mucho más allá de lo que la legislación recomienda o permite, y que existe un riesgo relevante de inundación en muchos puntos del país. Esto no es algo que suceda sólo aquí, con lo que la UE estableció en 2007 las bases para la gestión del riesgo de inundaciones, en su directiva 2007/60/CE.

La directiva 2007/60/CE se traspone en la legislación española en el RD 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, en el que se establece un plan de acción basado en ciclos de planificación de 6 años de duración, en los que se va avanzando en la definición del riesgo. En la primera fase, de evaluación preliminar del riesgo de inundaciones (EPRI), las administraciones hidráulicas, como Augas de Galicia en las cuencas internas de nuestra comunidad, determinaron las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI). Estas áreas, que se pueden ir ampliando o redefiniendo, son la base para las fases sucesivas.

La segunda fase (MAPRI) incluyó la confección de mapas de peligrosidad y riesgo, disponibles en general para la ciudadanía y en concreto en la web de Augas de Galicia, para todas las ARPSI de las cuencas internas de la comunidad. En el ciclo actual (2015-2021) se implantará el Plan de gestión del riesgo de inundación (PXRI), aprobado en el Real Decreto 19/2016, de 15 de enero, por el que se aprueba el Plan de gestión del riesgo de inundación de la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa, que se centra en las zonas de mayor riesgo potencial.

Como parte de las herramientas de gestión, destacan los sistemas de predicción y alerta, que permiten bajar el nivel de exposición a una inundación retirando los activos valiosos y móviles de las zonas potencialmente afectadas y evacuar a la población, lo que reduce el daño producido por una inundación. Los sistemas de predicción y alerta forman parte de los sistemas de alerta temprana (SAT), que incluyen, además de la predicción, procedimientos de información a la población y de respuesta operativa para la eventual evacuación, entre otros.

Un SAT implica una buena coordinación interinstitucional, ya que el ciclo de información incluye, además de la administración hidráulica, a las agencias meteorológicas, cuya información es la base de las predicciones hidrológicas, y las autoridades municipales y protección civil, que son los encargados de la operativa, una vez se ha detectado una amenaza potencial.

En esta ponencia se presenta una pieza dentro de ese complejo entramado, que intenta avanzar no sólo en la definición técnica de la amenaza sino en establecer las mejores relaciones con los sectores involucrados en la toma de decisión frente a una potencial inundación. El proyecto MERLIN busca proveer a la administración hidráulica de Galicia de elementos para una toma de decisión informada en las cuestiones de su competencia, y elaborar información para otras agencias, como Protección Civil, también de acuerdo con sus necesidades.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO MERLÍN

2.1. Aspectos previos

Augas de Galicia, como autoridad en las cuencas internas de Galicia, dispone desde hace ya varios años de un sistema de pronóstico de caudales en las zonas en las que se considera que puede existir un riesgo de inundación. Este sistema, denominado ARTEMIS, ha permitido estimar con cierta anticipación los caudales esperables y existe ya un procedimiento de comunicación con otras agencias, como Protección Civil, a las que se informa de las alertas que indica el sistema.

A pesar de que es un sistema que ha sido muy útil en los últimos años, Augas de Galicia ha decidido renovarlo, por varios motivos:

- Es un sistema a cuyas fuentes los técnicos de Augas de Galicia no tienen un acceso directo, lo que hace difícil su actualización. Se busca en el futuro disponer de un sistema completamente abierto, que sólo integre software de uso libre.
- Se busca un sistema modular que permita la sustitución de un bloque de cálculo si aparece otro que aporte ventajas, manteniendo el resto y la estructura general.
- El modelo actual sólo calcula caudales a partir de predicciones meteorológicas. Se busca dar un paso más, y calculará niveles de inundación.
- Los niveles de inundación no sólo dependen de la precipitación. En un entorno como Galicia la influencia de la marea en núcleos costeros es muy relevante. El nuevo modelo también debe considerarla.

El proyecto MERLIN (Modelo de Evaluación del Riesgo Local de INundación) se desarrolla en el marco de un Convenio de Colaboración entre las entidades Augas de Galicia y Universidade Da Coruña, de modo que el personal técnico de ambas instituciones desarrolla y conoce el modelo, lo que permitirá un mantenimiento y una explotación directos por personal de Augas de Galicia una vez implementado, sin dependencia de terceros y con plena capacidad de modificación, ampliación o mejora en el futuro.

Hay que destacar además la participación de otras entidades sin cuyo concurso el proyecto no sería viable: en la actualidad los datos meteorológicos se obtienen de modo directo y en tiempo real del servidor de MeteoGalicia. Este servidor está alojado en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA), donde también se ha implementado MERLÍN. Dado que el CESGA cuenta con máquinas que permiten la computación de altas prestaciones, es posible realizar cálculos paralelos y por lo tanto modelizar tantas cuencas como se desee sin incrementar los tiempos de respuesta, que son vitales en una modelización con una finalidad operativa en tiempo real. También se están estableciendo en la actualidad contactos con AEMET para incluir sus predicciones meteorológicas adicionalmente a las de MeteoGalicia.

Es importante destacar las singularidades de las cuencas internas de Galicia. De acuerdo con el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de Galicia-Costa (2013), la extensión global de las cuencas incluidas es de 12.991 km^2, sobre 29.575 km^2 en la comunidad, con una población del orden de 2.070.000 habitantes, sobre 2,75 millones en la comunidad. Una parte del área de las provincias de Pontevedra, Lugo y sobre todo Ourense forman parte de otras demarcaciones hidrográficas, destacando la del Miño-Sil, pero la mayor parte de la población de Galicia está en el ámbito de Galicia-Costa.



Figura 1. Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa. Sistemas de explotación.

El ámbito competencial de Augas de Galicia incluye una multitud de pequeñas cuencas. Para su análisis, Augas de Galicia divide el área en sistemas de explotación, que son por lo general agregaciones de cuencas completas. Por ejemplo, el sistema de explotación 5 incluye la cuenca del río Ulla, la mayor cuenca interna de Galicia, pero también incluye las cuencas que forman la margen derecha de la ría de Arousa, lo que supone un conjunto de cuencas muy pequeñas que nacen en la Sierra del Barbanza y que desembocan en núcleos costeros, de interés pesquero y turístico, como Rianxo, Boiro, A Pobra do Caramiñal o Ribeira.

Son este tipo de cuencas pequeñas, de algunos km^2 o de algunas decenas de km^2 las que caracterizan el litoral de Galicia, y estas cuencas han generado en los últimos años algunos problemas de inundación debido tanto a fenómenos meteorológicos particularmente intensos como a un urbanismo poco respetuoso con los cauces. El hecho de que muchas de las ARPSI de Galicia-Costa se ubiquen en cuencas pequeñas es problemático a la hora de hacer predicciones sobre su riesgo de generar una inundación, por dos motivos:

- Los tiempos de respuesta son muy cortos, con lo que no es posible basar el sistema de alarmas en registros de precipitación en zonas altas de las cuencas, o en niveles en las cabeceras, como se realiza en otras demarcaciones hidrográficas, cuyos tiempos de respuesta son de varios días.
- La precisión en la determinación de la lluvia tiene que ser la mayor posible, ya que la pequeña desviación de un frente o de un fenómeno local de precipitación en solo unos pocos kilómetros puede llevar a que en una cuenca haya una inundación, o no llueva en absoluto.

De este modo, se trata de un área de trabajo muy exigente. Se da la circunstancia de que se han registrado en los últimos años algunos episodios de inundación incluso con pérdidas humanas en

cuencas verdaderamente pequeñas, de menos de 10 km^2, con lo que existe una cierta presión y demanda social para disponer de sistemas de alarma en estas cuencas. El sistema ARTEMIS, que ha demostrado fiabilidad en cuencas de tamaño medio, no se diseñó para analizar eventos en cuencas tan pequeñas, lo que justifica también su renovación.

MERLIN es un sistema de pronóstico de zonas inundables, que se nutre de datos meteorológicos, además de datos de humedad del suelo y de las mareas, si procede. El cálculo del caudal generado por la escorrentía se considera una variable instrumental, pues la diferencia sustantiva entre MERLIN y ARTEMIS es que el dato final ya no es el pronóstico de un caudal, sino que son pronósticos de mapas de inundaciones, que permiten observar en tiempo real cuáles son las zonas con riesgo de inundarse e incluso estimar los daños y costes asociados a esas inundaciones potenciales.

Para la calibración de MERLIN, proceso continuo durante la vigencia del proyecto, Augas de Galicia va a fortalecer y reconfigurar su red hidrométrica. La actual red de puntos de aforo se ubica en general en zonas rurales y está orientada a la medición de caudales, muy pocas veces a partir de estructuras de aforo y más frecuentemente a partir de secciones más o menos estables y campañas periódicas de aforo. El uso fundamental de estos puntos es la estimación del recurso hídrico, ya que la relación nivel-caudal está mucho mejor calibrada para caudales medios y bajos que para caudales extremos.

Augas de Galicia, dentro de las actividades vinculadas al proyecto MERLIN, va a mejorar la capacidad predictiva de sus actuales estaciones de aforo en aquellos puntos en los que las secciones se abren en exceso para caudales altos o en los que no hay suficientes puntos de aforo asociados a crecidas. Se utilizará el modelo Iber, aplicado en detalle al área de las estaciones de aforo, para observar cómo evoluciona la relación nivel-caudal para caudales altos una vez calibrado para caudales medios y bajos. Esta técnica ya ha permitido mejorar la capacidad predictiva de algunas estaciones hidrométricas utilizadas en la implementación piloto.

Adicionalmente, Augas de Galicia implementará estaciones adicionales de medida de niveles en las ARPSI más relevantes, de modo que se disponga de medidas directas y en tiempo real del nivel de inundación. Estas estaciones permitirán la calibración y la mejora de la capacidad predictiva de MERLIN, cuya misión última será predecir esos niveles. Estas estaciones se ubicarán típicamente en tramos urbanos de ríos, o en otras zonas donde las inundaciones generen daños relevantes.

2.2. Estructura del proyecto MERLIN

MERLIN predice los caudales y calados estimados en ARPSI de diferentes cuencas a partir de observaciones y predicciones hidro-meteorológicas. El funcionamiento del sistema, que funciona de modo automático y en tiempo real se organiza en dos fases: una fase de inicialización con base en la información de días anteriores y una fase de predicción. Durante la fase de inicialización, el sistema reproduce el estado de la humedad del suelo en las cuencas al comienzo de la predicción. Para ello alimenta a los modelos hidrológicos de las cuencas incluidas en el sistema con observaciones meteorológicas y de caudales de los últimos 30 días. Es importante recordar la importancia de la fase de inicialización, debido al impacto de la humedad del suelo en las posteriores predicciones de caudal previamente destacado.

Durante la fase de predicción, se determinan los caudales y los niveles esperados durante los próximos días a lo largo de las cuencas incluidas en el sistema. Para ello se utilizan predicciones meteorológicas y los modelos hidrológicos previamente inicializados. Los hidrogramas obtenidos se utilizan como condiciones de contorno de modelos hidráulicos de las ARPSI para evaluar el riesgo de inundación.

MERLIN considera dos niveles de análisis. Los modelos hidrológicos se aplican a nivel de cuenca, y su resultado es la distribución de caudales a lo largo de la misma. Los modelos hidráulicos se aplican

a nivel de ARPSI. Es bastante frecuente que existan varias ARPSI unas aguas abajo de otras a lo largo de un río. En este caso basta con un modelo hidrológico para todas, pero se desarrolla un modelo hidráulico para cada una.

Para realizar todas estas tareas, MERLIN se estructura en tres módulos (meteorológico, hidrológico e hidráulico), constituidos por una serie de librerías escritas en lenguaje Python. Estas librerías se coordinan mediante un script, escrito también en Python, que regula el funcionamiento del sistema y el intercambio de información entre módulos representado en la figura 2.

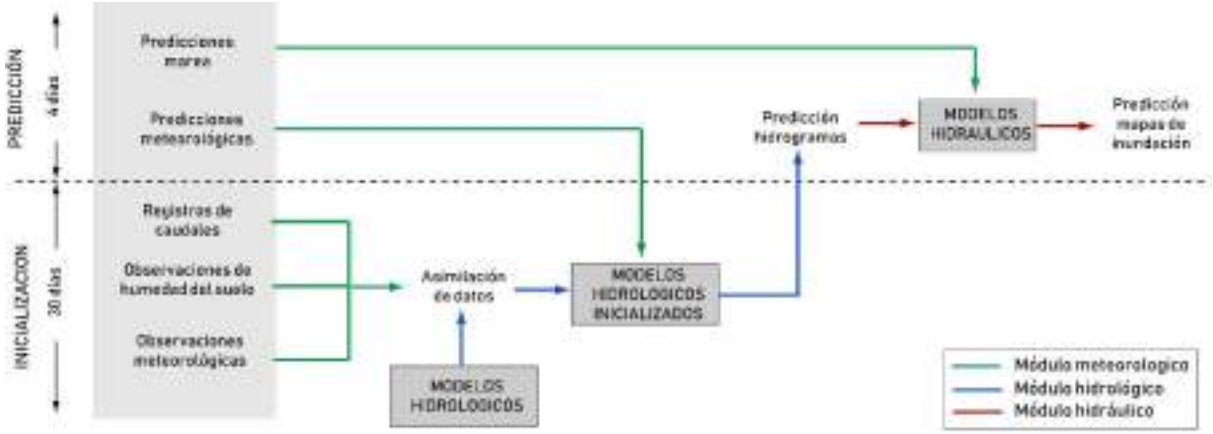


Figura 2. Diagrama de procesos del MERLIN, indicando los procesos realizados por cada módulo.

2.2.1. Módulo meteorológico

El módulo meteorológico adquiere y procesa los datos meteorológicos utilizados por los modelos hidráulicos e hidrológicos. Asimismo, el módulo realiza la conversión de la información a los formatos requeridos por cada modelo.

Durante la fase de inicialización, la información meteorológica que asimila el modelo hidrológico consiste en observaciones de la humedad del suelo, caudal, precipitación, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar. Los datos de precipitación, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar se obtienen de mapas meteorológicos que elabora diariamente Meteogalicia.

Estos mapas tienen resoluciones espacial y temporal de 250 metros y 1 hora respectivamente. Meteogalicia elabora estos mapas interpolando espacialmente los registros de su red de estaciones de medida. En el caso de la precipitación, la interpolación se realiza fusionando las observaciones del radar meteorológico y la red pluviométrica. De esta manera se obtiene una estimación muy precisa de la lluvia real, ya que se combina la capacidad del radar de capturar la distribución espacial de la lluvia y la precisión de los pluviómetros al medir la precipitación en superficie. Para acceder a los mapas meteorológicos de Meteogalicia, se ha habilitado un servicio ftp en el que la agencia meteorológica almacena los mapas de las últimas 72 horas.

La información de la humedad del suelo al comienzo de la fase de inicialización corresponde a uno de los productos de datos del satélite Soil Moisture Active Passive (SMAP) que opera la National Aeronautics and Space Administration (NASA) del gobierno estadounidense. En concreto se utilizan los datos de humedad del subsuelo del modelo de nivel 4, que corrige las observaciones del satélite con re-análisis de modelos numéricos. Los datos de humedad tienen una resolución espacial de 9 km.

Los datos de caudal empleados en la fase de inicialización corresponden a los registros de las

estaciones de aforo que opera Augas de Galicia. Estas estaciones aportan información del caudal con frecuencia diezminutal y en tiempo real.

Durante la fase de predicción, el módulo meteorológico adquiere las predicciones de precipitación, temperatura y humedad del aire, radiación y velocidad del viento obtenidas con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), que opera Meteogalicia. Estas predicciones tienen resoluciones espacial y temporal de 4 km y 1 hora respectivamente.

Es importante destacar en este punto que, a pesar de ser productos muy evolucionados y en el límite del conocimiento actual, estos modelos suponen hoy por hoy una limitación a la precisión global de MERLIN, ya que una malla de 4x4 km^2 supera la superficie de algunas de las cuencas en las que se está trabajando, con lo que no se puede suministrar a esas cuencas una malla de valores de precipitación sino uno solo, y sujeto a errores. Adicionalmente, en cuencas muy pequeñas una resolución temporal de una hora puede ser excesiva, ya que los tiempos de concentración de algunas de las cuencas analizadas no son muy superiores.

En este sentido, se está trabajando con Meteogalicia y con AEMET para incorporar en un futuro, más o menos inmediato, productos meteorológicos de mayor resolución, que mejoren la capacidad predictiva del modelo.

MERLIN utiliza tres productos de predicción obtenidos con el modelo WRF: dos predicciones puntuales (conocidas en Meteogalicia como deterministas) y el llamado ensemble meteorológico, que es un conjunto de predicciones levemente (o radicalmente) distintas. Las predicciones deterministas aportan un pronóstico con un horizonte de predicción de 96 horas, y se realizan dos veces al día, a las 00 y 12 horas UTC. La predicción ensemble consiste en una familia de 21 predicciones meteorológicas, que se realizan una vez al día, a las 00 horas UTC.

El módulo meteorológico adquiere los datos necesarios desde este servidor empleando el protocolo OpenDAP, que permite descargar únicamente la información de variables y áreas de estudio concretas. Esta capacidad reduce de manera importante el tiempo necesario para el procesado de datos meteorológicos, que suele ser uno de los cuellos de botella en los sistemas operacionales dado el volumen que ocupan estos datos.

En la fase de predicción, el módulo meteorológico también adquiere las predicciones de nivel de marea en la desembocadura de los ríos incluidos en el sistema de alerta. Las predicciones se obtienen del modelo Regional Ocean Modelling System (ROMS) que opera Meteogalicia en la margen atlántica ibérica. Este modelo incorpora los forzadores de marea astronómica y meteorológica, lo que permite incluir en el sistema de alerta las elevaciones del nivel del mar provocadas por fenómenos meteorológicos extremos (storm surge). Los niveles de marea predichos definen las condiciones de contorno de los modelos hidrodinámicos, como se detalla en las secciones siguientes.

2.2.2. Módulo hidrológico

El modulo hidrológico predice los caudales a lo largo de las cuencas incluidas en el sistema de alerta. Este módulo está compuesto por los modelos hidrológicos de las cuencas y una serie de funciones escritas en Python para construir los modelos, lanzar las simulaciones y procesar los resultados.

El modelo hidrológico de cada cuenca se construyó empleando la versión 4.2.1 del software HEC-HMS, que es uno de los modelos más empleados en hidrología operacional debido a su bajo coste computacional y a la existencia de aplicaciones que permiten adaptar una gran variedad de archivos a los formatos requeridos por el sistema. Sin embargo, dado el carácter modular del sistema MERLIN, se puede reemplazar el modelo HEC-HMS por otro más evolucionado. HEC-HMS es un modelo

semi-distribuido que discretiza una cuenca en tramos de río y sub-cuencas con características homogéneas.

De modo paralelo a la implementación de MERLIN se está trabajando en el desarrollo de un módulo hidrológico alternativo, basado en el modelo Iber, que en la actualidad ya dispone de capacidades hidrológicas, que se están mejorando. La tendencia a medio plazo será la sustitución de HMS por Iber, que aportará un modelo totalmente distribuido, lo que permite aprovechar mejor algunas fuentes de información, como los modelos digitales del terreno o las bases de datos de usos y tipo de suelo, que en la actualidad se utilizan mediante su simplificación o promediado en parámetros hidrológicos aplicados a subcuencas.

Pese a todo, la respuesta de HMS una vez calibrado es muy correcta, con lo que la actual configuración de MERLIN es perfectamente operativa y válida para los fines perseguidos.

Durante la fase de inicialización, se ajustan los parámetros que alimentan los modelos hidrológicos con las observaciones hidro-meteorológicas previamente descritas. Para ello, se simula la transformación lluvia-escorrentía del periodo de inicialización con diferentes combinaciones de los parámetros a ajustar. El hidrograma calculado con cada una de estas combinaciones de parámetros se compara con los registros de caudal de la estación de aforo correspondiente empleando una métrica especialmente indicada para identificar los valores de parámetros que mejor reproducen las puntas de caudal. Los rangos de muestreo de cada parámetro se han obtenido a partir de estudios preliminares de cada cuenca.

Durante la fase de predicción, los modelos determinan los caudales a lo largo de la cuenca durante los siguientes 4 días. Para ello, el modelo hidrológico de cada cuenca se alimenta con las predicciones meteorológicas descritas en el apartado anterior (predicciones deterministas y ensembles), y los valores de los parámetros obtenidos en la fase de inicialización.

2.2.3. Módulo hidráulico

El módulo hidráulico toma los caudales generados en el módulo hidrológico en los puntos de interés, que en general corresponderán a ARPSI y calcula los calados y velocidades esperados durante los siguientes días, considerando, si procede, los niveles de marea. El módulo hidráulico comprende los modelos hidráulicos de las ARPSI y una serie de funciones, escritas en lenguaje Python, para establecer en los modelos las condiciones de contorno correspondientes, lanzar las simulaciones y procesar los resultados.

El sistema MERLIN emplea como modelo hidráulico Iber+ (García-Feal et al. 2018), una versión paralelizada en GPU del modelo Iber (Bladé et al. 2014). La versión paralelizada del modelo Iber reduce en dos órdenes de magnitud el tiempo de cálculo respecto del original, lo que resulta especialmente importante para su aplicación en sistemas operacionales.

A diferencia de los modelos hidrológicos, los modelos hidrodinámicos no requieren una inicialización previa y por tanto sólo se ejecutan durante la fase de predicción del sistema de alerta. Los parámetros de entrada requeridos por los modelos son los coeficientes de fricción, que se definen previamente a la construcción de los modelos a partir de visitas a campo y fotografías aéreas.

Para cada día del periodo de predicción, los modelos hidrodinámicos se ejecutan utilizando como variables de entrada los caudales predichos por los modelos hidrológicos. En el caso de ARPSI situadas en zonas costeras, también se imponen los niveles de marea correspondientes. En el caso de los pronósticos basados en los ensembles meteorológicos, cada día del periodo de predicción se simula considerando 3 hidrogramas en lugar de los 21 obtenidos de las diferentes predicciones

meteorológicas, que sí se calculan en los modelos hidrológicos. De esta manera se reduce el tiempo de cálculo necesario. Los 3 hidrogramas simulados corresponden al valor medio y a los límites superior e inferior del intervalo de confianza del 95% de los caudales predichos por los modelos hidrológicos.

A partir de los calados y velocidades máximas obtenidas, para cada día y por cada modelo hidráulico se producen en la actualidad dos tipos de resultados. El primero de ellos corresponde a la máxima extensión de la zona inundada, que se obtiene delimitando mediante un polígono las áreas con un calado no nulo. El segundo de ellos consiste en una familia de polígonos con el riesgo hidráulico de las áreas anegadas, de acuerdo al criterio establecido en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (figura 3), que implica la evaluación del producto del nivel y la velocidad, con carácter general.

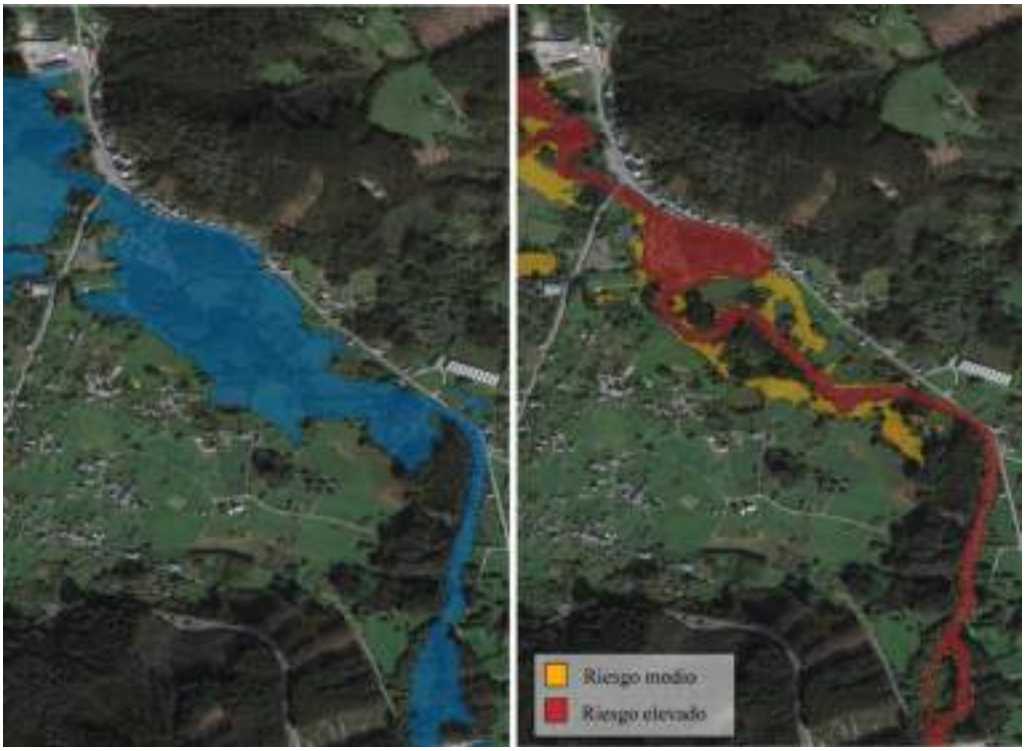


Figura 3. Ejemplo de polígonos con la máxima extensión de la inundación (izquierda) y zonas de riesgo (derecha).

2.2.4. Aplicación web de visualización de resultados

El sistema MERLIN genera automáticamente predicciones de caudal y niveles en áreas de riesgo potencial de inundación. Es importante que estas predicciones puedan ser consultadas de manera sencilla para facilitar a las autoridades competentes la gestión de los eventos de inundación predichos.

Se ha desarrollado un visor web que permite consultar en tiempo real la información relevante en cada cuenca. En su configuración actual, en fase beta, el visor (figura 4) presenta las cuencas sobre un mapa de Galicia-Costa con un código de colores que permite observar si alguna de ellas tiene riesgo de alarma en los próximos días. Adicionalmente, una tabla resumen indica las estimaciones de niveles y caudales máximos para los próximos días en cada ARPSI, también con un código de colores asociado.

En la zona inferior del visor se puede particularizar la información para una ARPSI, y se muestra, como sucesión de fotos o como video, la evolución del mapa de inundaciones previstas según cada

uno de los pronósticos (deterministas, ensembles promedio o extremos). Los mapas de inundación prevista se pueden comparar con los límites del Dominio Público Hidráulico y con las líneas que limitan las zonas inundables para distintos periodos de retorno, que se pueden presentar u ocultar en el visor. En lugar de los niveles se pueden presentar los niveles de riesgo.

Adicionalmente se presenta la evolución de caudales o niveles en forma gráfica, bien para un escenario de predicción singular, bien para todos ellos superpuestos. Todos los datos son almacenados y se pueden exportar para su análisis detallado. Los cuadrantes del visor se pueden ampliar a pantalla completa.



Figura 4. Visor de MERLIN en fase beta

En la fase actual de los trabajos se está presentando MERLIN a las entidades relevantes para la toma de decisión (en especial a Protección Civil y a los técnicos competentes en los ayuntamientos) para personalizar MERLIN de acuerdo con sus necesidades.

Por ejemplo, los técnicos de Protección Civil no requieren de un modo destacado los datos de caudal sino los de nivel, y tampoco les resulta útil el mapa de riesgo definido según las directrices del RDPH, sino que prefieren que los niveles de riesgo verde, amarillo o rojo, por usar el código de colores usual, se vinculen a hitos de inundación local, en cada ARPSI, a definir con los municipios.

De este modo, habrá un nivel que comenzará a inundar un cierto tipo de infraestructuras poco críticas, y ese será el nivel amarillo, y otro superior donde ya habrá afecciones a infraestructuras relevantes, y ese será el rojo. La definición concreta de los umbrales y cuáles son los niveles o hitos que cambian el nivel de riesgo se realizará en reuniones trilaterales con Protección Civil, cada municipio y Augas de Galicia, con el apoyo del equipo de la UDC que desarrolla MERLIN. Augas velará por un criterio más o menos homogéneo, respetando las singularidades de cada ARPSI.

Esta información local enriquecerá y personalizará el entorno web de MERLIN, que tendrá distintas presentaciones y privilegios de acceso para los distintos usuarios según la información que deseen ver de un modo más destacado.

3. FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS COMPARATIVO

MERLIN se ha implementado en cinco cuencas piloto como paso previo a su desarrollo general a todas las cuencas de Galicia-Costa. Se han escogido cuencas y ARPSI de cierta complejidad, para poder evaluar la capacidad predictiva real de MERLIN en entornos complicados, como por ejemplo cuencas muy pequeñas. Las cuencas de los ríos Mandeo, Landro o verdugo-Oitavén tienen unos centenares de km^2, y son cuencas de tamaño medio en Galicia, mientras que las cuencas de Grova (17 km^2) y Cee (5 km^2) se han incluido en la primera etapa piloto para evaluar la factibilidad de disponer de estimaciones en este tipo de cuencas.

La cuenca vertiente a la localidad de Cee generó inundaciones con importantes daños materiales en los episodios extremos del año 2006, con lo que tiene interés real, más allá de que suponga un reto en el límite de la capacidad predictiva del sistema.

MERLIN está operativo en estas cuencas piloto desde noviembre de 2019, y ha registrado el efecto de varios eventos de precipitación relevantes que ocurrieron esencialmente en diciembre de 2019. Estas precipitaciones en algunos casos generaron caudales importantes, con niveles fuera de los cauces, pero no se han registrado hasta la afe4ccioens significativas.

Del análisis de estos sucesos se pueden sacar algunas conclusiones importantes. Hasta la fecha, Augas de Galicia, trabajando con el modelo ARTEMIS disponía de pronósticos de caudales solo a partir de una predicción determinista de precipitaciones, mientras que en la actualidad se cuenta adicionalmente con los 21 ensembles, que permiten establecer un intervalo de pronósticos que Meteogalicia considera verosímiles.

Las figuras 5 y 6 presentan las predicciones de caudal de MERLIN a partir de dos predicciones deterministas consecutivas (a las 00 y a las 12) y del promedio de los ensembles del mismo día para dos sucesos distintos registrados los días 12 y 18 de diciembre de 2019. Se han incluido además los caudales registrados en las estaciones de aforo correspondientes a cada cuenca como elemento de comparación.

Se puede observar en la figura 5 como todas las predicciones de precipitación (líneas en la parte superior del gráfico) están más o menos empaquetadas. La franja coloreada corresponde al intervalo definido por los extremos de los ensembles (5 y 95%), mientras que las líneas corresponden con las dos predicciones deterministas.

Estas predicciones de precipitación bien acotadas dan lugar, en la parte inferior de la figura, a predicciones de caudal asimismo concordantes, con diferencias razonables entre el conjunto de predicciones. El caudal medido, en punteado rojo, es asimismo razonablemente concordante con las predicciones.

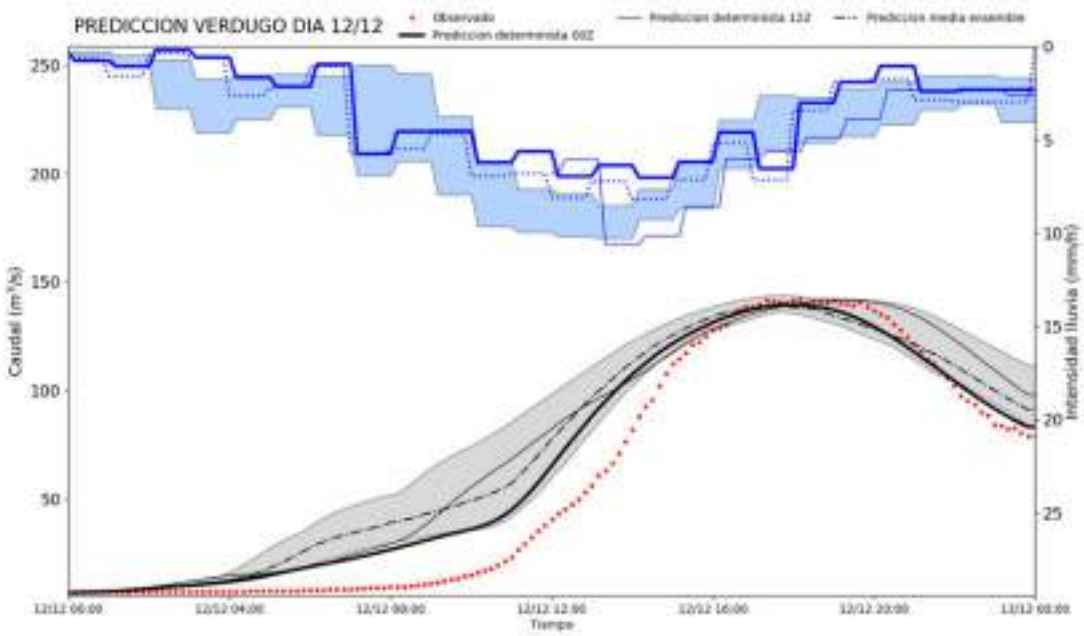


Figura 5. Predicciones para el día 12 de diciembre de 2019. Río Verdugo.

Si se observan ahora las predicciones del evento del día 18 de diciembre de 2019 en la figura 6, se observa que las propuestas de los ensembles y de los pronósticos deterministas son muy discordantes, con intensidades que pueden oscilar entre 0 y 10-15 mm/h durante varias horas, lo que genera caudales cercanos al basal (si no llueve) o importante para la cuenca y cercanos a niveles de inundación.

Esta situación no es infrecuente, porque una leve variación en la entrada de los frentes o en su desplazamiento puede generar grandes diferencias en los mapas de intensidad de precipitación en áreas tan pequeñas. Esta incertidumbre, que se conoce a priori, es un dato importante para la toma de decisión del que Augas de Galicia no tenía constancia con el modelo anterior, que solo manejaba un pronóstico de lluvia. MERLIN permite ahora no sólo dar pronósticos, sino acotar el margen de fiabilidad de los mismos.

Como se observa en la figura 6, el orden de magnitud de los picos de caudal (y por tanto de las áreas inundables máximas) ofrecido por los promedios de los ensembles y el registrado en este caso es similar, y las discrepancias no pueden ser atribuidas al sistema, sino a la incertidumbre inherente al problema que se quiere resolver. La lluvia observada, en trazo punteado, se parece bastante al primer pico y el ajuste de este es razonable, hay un segundo pico no previsto por ningún ensemble que genera un pequeño pico inesperado, y el tercer pico aparece más tarde y con menor intensidad de lo esperado, lo que se refleja en el correspondiente hidrograma.

Es perfectamente posible, por tanto, sobre todo en las cuencas pequeñas, que se obtengan pronósticos erróneos en otros eventos, pero la incertidumbre observada en la lluvia ya puede dar una alarma sobre la baja fiabilidad de estos pronósticos.

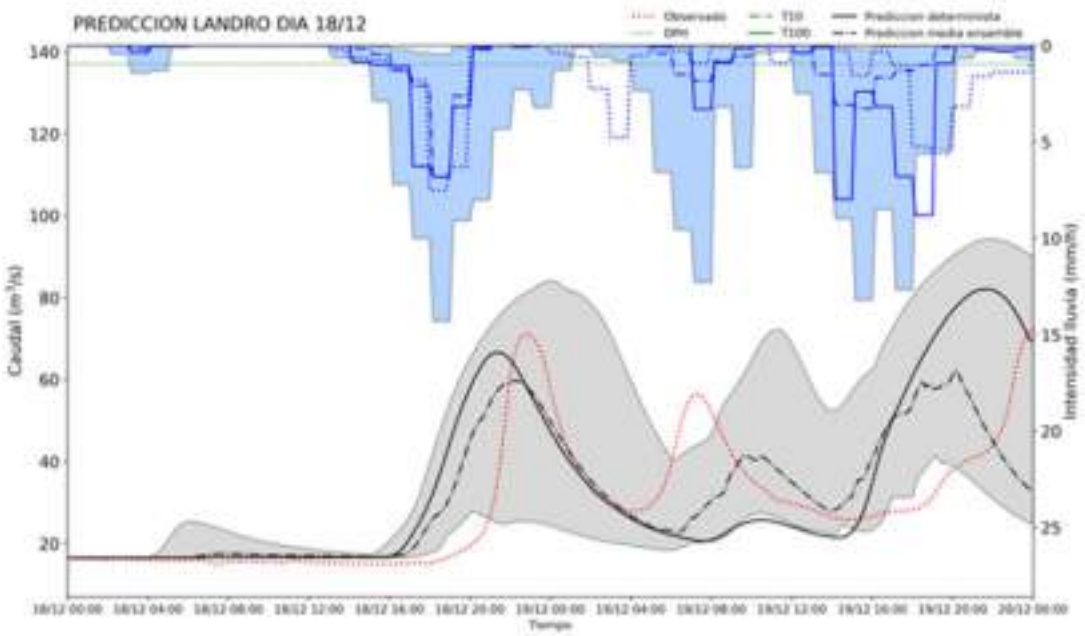
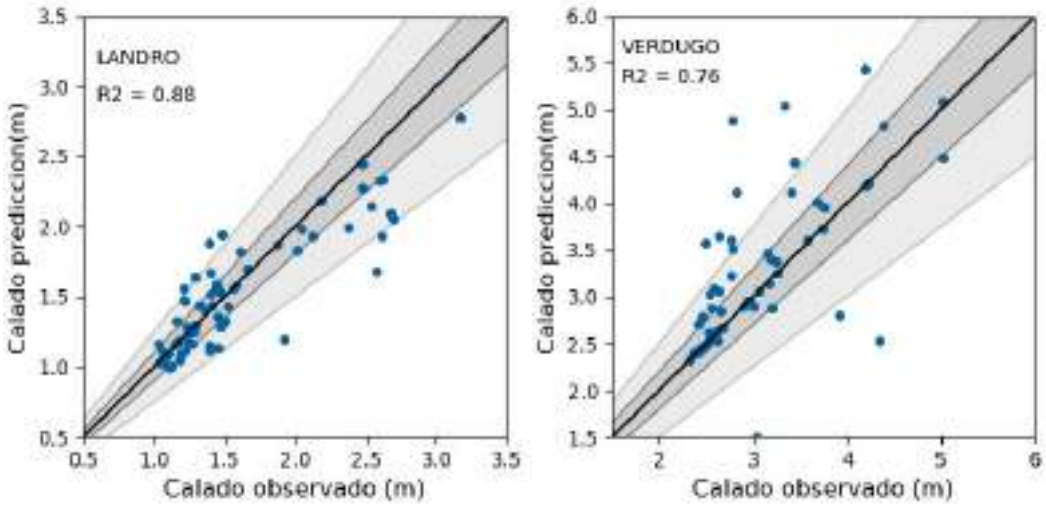


Figura 6. Predicción para el evento del día 18 de diciembre de 2018.

Se han realizado con los datos disponibles desde noviembre de 2018 varios análisis para estimar la fiabilidad del sistema. La figura 7 incluye comparaciones entre niveles predichos y registrados en las estaciones hidrométricas en cuatro de las cuencas analizadas, en las que se cuenta con estaciones hidrométricas. Las cuencas de los ríos Landro y Verdugo son relativamente grandes (del orden de algunas centenas de km^2) mientras que las de los ríos Grova y Cee son muy pequeñas. Se observa cómo los ajustes son claramente peores en estas últimas.



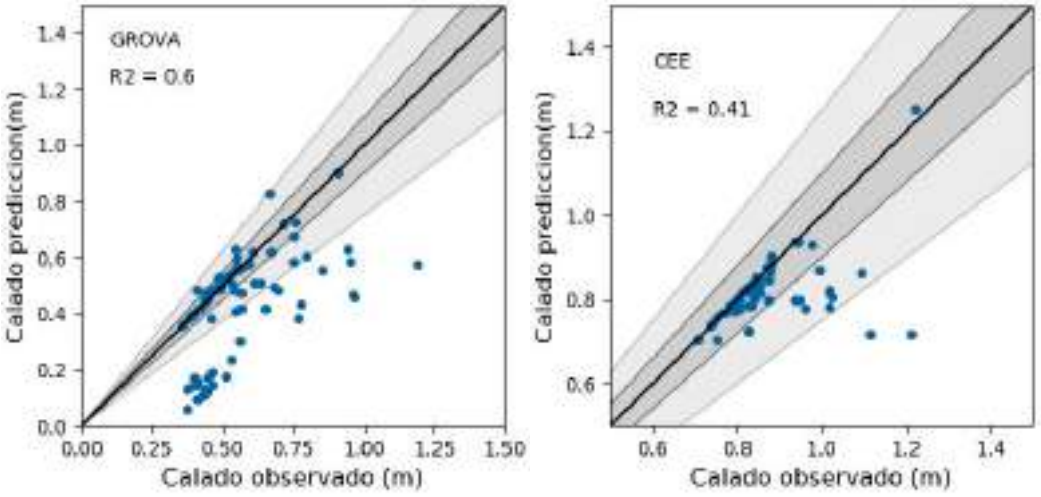


Figura 7. Comparación de calados predichos y observados en las secciones de aforo de los ríos Landro, Verdugo, Grova y Cee. El sombreado oscuro corresponde a diferencias del 10% y el claro del 25%.

Respecto de estos ajustes, hay que decir que no se puede considerar que los datos de las estaciones de aforo sean perfectos. Como se indicó con anterioridad, algunas de estas estaciones de aforo, y en particular las de los ríos Cee y Grova, no disponen de secciones de control y no se ubican en secciones estables, con lo que sus curvas de gasto varían año a año y su rango de niveles aforados no permite confiar plenamente en ellas, sobre todo en caudales altos. De hecho, Augas de Galicia va a implementar limnímetros adicionales para paliar estas deficiencias en las propias ARPSI. Una vez soslayados estos problemas y mejorada la calibración del modelo, se esperan mejores ajustes.

Adicionalmente, se está trabajando con Meteogalicia y AEMET para incorporar estimaciones de precipitación más detallados (del orden de 1 km^2) y con intervalos más pequeños (del orden de 15 minutos, en lugar de una hora). Dado que MERLIN es un sistema modular y abierto, la incorporación de estas mejoras es más o menos inmediata.

Se presenta por último la comparación de MERLIN con ARTEMIS en la cuenca del río Landro, donde ambos sistemas están operativos (ARTEMIS no calcula en cuencas tan pequeñas como Cee o Grova). Dado que ARTEMIS ofrece datos de caudal, y no de nivel, se comparan los caudales predichos. En la figura 8 se presenta la comparación en el periodo de intercalibración, donde se observa que MERLIN ofrece por lo general un mejor pronóstico.

Es importante destacar que ARTEMIS ofrece buenos resultados en varias cuencas de Galicia-Costa, pero la del Landro es ya una cuenca relativamente pequeña y las predicciones son algo menos afinadas para este sistema.

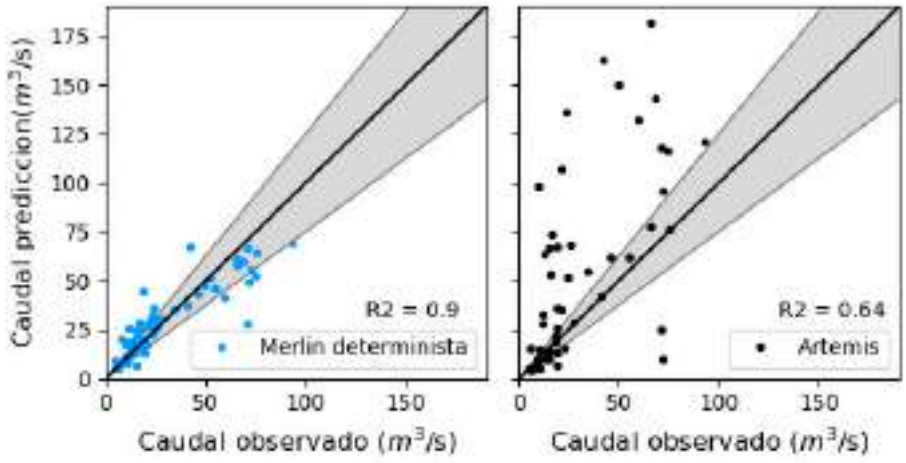


Figura 8. Comparación entre caudales máximos diarios predichos y observados por los sistemas MERLIN (izquierda) y ARTEMIS (derecha). La línea continua corresponde a un ajuste 1:1 y el intervalo sombreado a diferencias del 25%. Resultados correspondientes al río Landro.

4. FUTUROS DESARROLLOS

La fase actual de desarrollo es la de aplicación a todas las cuencas de la demarcación y a las ARPSI prioritarias. Tras una fase inicial piloto de desarrollo en las instalaciones de la UDC, MERLIN ha sido migrado al CESGA para garantizar velocidad de cálculo en paralelo con independencia del número de cuencas o ARPSI a analizar y fiabilidad en el entorno informático, dado que se trata de un sistema operativo que no puede fallar y que requiere además de seguridad frente a intrusiones o hackeos.

El proceso de implementación a todas las cuencas se prolonga durante 18 meses e incluye el desarrollo de los modelos hidrológicos y el afino de los modelos hidráulicos que se desarrollaron para la obtención de los mapas de riesgo, y que en algunos casos pueden requerir de alguna mejora puntual.

También en la fase actual de desarrollo se comenzará un ciclo de consultas con Protección Civil y actores municipales para la definición de niveles de riesgo que tengan un significado claro a nivel local, según lo ya comentado, y que sean consistentes con los planes de actuación municipal recogidos en el Plan de Inundaciones de Galicia (Inungal) desarrollado por Protección Civil. De este modo, MERLIN pasa a ser una pieza clave en el sistema de alerta frente al riesgo de inundaciones cuyas fases operativas ya dependerán de otros actores. Estas consultas ya deberían estar más avanzadas, pero se han visto postergadas debido a las medidas de confinamiento derivadas de la crisis COVID-19, que también ha afectado, obviamente, a las prioridades de Protección Civil.

Vinculado con esto está la mejora y personalización del visor web, que tendrá distintos niveles de acceso y distintas funcionalidades, más completas para el personal técnico de Augas de Galicia, y más simples y directas para los actores que deben poner en marcha los procedimientos operativos. En todo caso, se trasladará a estos actores tanto el pronóstico como un índice de la fiabilidad del mismo, basado en los niveles de incertidumbre en las predicciones meteorológicas que se han presentado y comentado en las figuras 5 y 6 y el texto alusivo a las mismas.

Los contactos permanentes con Meteogalicia y AEMET permitirán avanzar en la fiabilidad de los datos meteorológicos. A corto plazo se van a incorporar datos del sistema de predicción numérica de alta resolución HARMONIE, con mallas más finas e intervalos de cálculo menores que los actuales, y se está analizando la posibilidad de bajar de modo específico la resolución espacial en zonas

puntuales donde se requiere más precisión. No obstante, el incremento de precisión del cálculo no garantiza necesariamente mayor capacidad predictiva, en la medida en que los modelos no sean capaces de captar pequeñas variaciones en las trayectorias de los frentes o en los fenómenos locales, lo que depende de muchos factores además del tamaño de malla. En cualquier caso, existe la voluntad de trabajar con los mejores modelos disponibles.

También se está trabajando en la mejora de la incorporación de los datos relativos a los embalses. Muchas de las pequeñas cuencas relevantes para el análisis de las ARPSI no tienen elementos de regulación, pero las de mayor tamaño sí suelen tenerlos. Augas de Galicia dispone de un sistema de gestión de datos relativos a niveles de embalses, pero sería necesario incorporar funcionalidades adicionales para poder considerar e incluso anticipar maniobras en los órganos de desagüe a partir de las predicciones de precipitación, de un modo rápido y seguro. Este es un tema que Augas de Galicia está analizando, y que podría optimizar el funcionamiento de los elementos de regulación en las cuencas.

El proyecto MERLIN ha trabajado hasta ahora con ARPSI cuyo origen de inundaciones es fluvial, es decir, que se produce una inundación porque los ríos crecen e inundan los núcleos urbanos. Existe no obstante un conjunto de núcleos urbanos donde las inundaciones se producen por insuficiencia de drenaje, dando lugar a inundaciones de origen pluvial. Durante esta fase del trabajo se comenzará a trabajar en la inclusión de ARPSI pluviales.

El análisis de ARPSI pluviales es verdaderamente complejo; además no es infrecuente que se combinen ambos tipos de inundación y exista una interdependencia entre los niveles de los ríos y la capacidad de drenaje. El único modo de trabajar este problema de un modo fiable es mediante el desarrollo de modelos duales, que sean capaces de modelizar la escorrentía superficial urbana, el flujo por la red de drenaje y el medio fluvial o costero de un modo simultáneo.

En la actualidad, se está trabajando en un modelo dual que combina el modelo Iber para el cálculo de la escorrentía superficial y el SWMM para el cálculo de flujo en colectores. SWMM (Storm Water Management Model) es el modelo de drenaje urbano de uso libre más contrastado en el mundo. Este acoplamiento entre Iber y SWMM cumple con los requisitos requeridos para un análisis detallado de las inundaciones pluviales.

El problema más importante, no obstante, no es disponer del modelo, sino de datos fiables sobre las redes de drenaje, que en muchas ocasiones no están adecuadamente actualizadas en los servicios correspondientes de las entidades locales. Los modelos duales tienden a trabajar con alta precisión, por lo que las redes deben idealmente estar definidas con todos sus pozos y sus imbornales, y por supuesto con todos sus tubos, depósitos, bombeos y actuaciones complementarias.

La experiencia de Augas de Galicia en auditoría de redes es muy amplia, ya que en los últimos años se ha invertido mucho esfuerzo y medios en el desarrollo de los planes de saneamiento de las rías gallegas, y existe la constancia de que en general hay muchas carencias en el conocimiento de las redes de drenaje, lo que será sin duda un problema a la hora de analizar las ARPSI pluviales. No obstante, gracias al desarrollo de estos planes se dispone de datos de alta calidad de un número relevante de núcleos urbanos, algunos de los cuales pueden utilizarse como pilotos en el análisis de ARPSI pluviales, en entornos que suelen incluir además cauces urbanos y el efecto de las mareas, con lo que se trata de pilotos exigentes y que garantizarán que la implementación general posterior será factible.

Por último, del mismo modo que los distintos ciclos de planificación del riesgo de inundaciones han ido avanzando hasta definir los mapas de riesgo, que incluyen no solo la delimitación de las zonas

inundables sino también la cuantificación de las pérdidas, se trabajará en la estimación de las pérdidas en los pronósticos, de modo que se pueda asignar a cada episodio previsto una estimación de los daños materiales esperados. Esta información es sensible, y su distribución debe ser restringida para no generar alarma social, pero aporta un evidente valor a la hora de priorizar actuaciones operativas.

Vinculado con esto, es importante incorporar el factor de resiliencia social como contrapunto al valor material de los elementos inundados. Si se considera una inundación que afecta a bienes materiales en dos áreas, una cuyos propietarios tienen una cierta capacidad adquisitiva, y otra con propietarios con bajos ingresos, es razonable pensar que el valor de los bienes inundados en la primera será mayor que en la segunda. Sin embargo, el impacto social de la inundación en la primera quizá no sea tan grande, porque probablemente los bienes estarán asegurados y/o los propietarios tendrán cierta capacidad de sobreponerse, lo que en la zona de bajos ingresos probablemente no será así, con lo que los efectos para este colectivo serán mucho más importantes.

La ponderación de los bienes en función de la resiliencia de los colectivos afectados es importante para una toma de decisiones operativa globalmente óptima, y es un aspecto a incorporar en las mejoras inmediatas de MERLIN.

Augas de Galicia está en la actualidad gestionando un bloque de recursos vinculado a la innovación aplicada a la gestión del agua (InnovaAugas), que permitirá, en un futuro inmediato, mejorar muchos de los procesos de captación y gestión de los datos, lo que redundará en un incremento de capacidades de todos servicios, y también de MERLIN.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas. J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 30(1), 1-10.
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J. M., & Formella, A. (2018). An accelerated tool for flood modelling based on Iber. *Water*, 10(10), 1459.

PLATAFORMAS DE ALERTA TEMPRANA Y DE GESTIÓN DE AVENIDAS. VISIÓN DESDE LA ADMINISTRACIÓN LOCAL

Miguel Fernández Mejuto
Área de Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante, España
Profesor asociado, Universidad de Alicante, España
mfmejuto@diputacionalicante.es
https://orcid.org/0000-0002-1682-2979

RESUMEN

Los efectos dañinos de las inundaciones no han parado de aumentar durante las últimas décadas. Los factores fundamentales para este incremento han sido el aumento de la vulnerabilidad y la exposición debido a la ocupación masiva de las zonas inundables. Es imprescindible que las administraciones locales se impliquen en la planificación de la prevención y mitigación de inundaciones para que esta tendencia pueda revertirse. Uno de los elementos esenciales para esta planificación son las plataformas de alerta temprana. La necesidad de su implantación es un objetivo respaldado por los organismos internacionales expertos en gestión de desastres. En el caso del sur de la provincia de Alicante, la Diputación, una Administración Local al servicio de los municipios, ha puesto en marcha, a través de una colaboración público-privada, el desarrollo de una plataforma de alerta temprana, cuya vocación es su implantación para los municipios provinciales y servir de herramienta de formación y comunicación con la ciudadanía.

1. INTRODUCCIÓN

Entre 2008 y 2017, la base internacional de desastres EM-DAT1 (https://emdat.be/) registró 3751 peligros naturales, de los cuales 3.157 (el 84,2%) tienen factores desencadenantes relacionados con el clima, y las inundaciones y tormentas representan por sí solas casi el sesenta y seis por ciento (66%) de los peligros naturales (IFRC, 2018).

Esta tendencia global también se manifiesta en España, donde los fenómenos meteorológicos constituyen el riesgo natural que más víctimas mortales causa, destacando las altas temperaturas (28% de las víctimas) y las inundaciones (20%) (DGPCE, 2020).
Además de las víctimas mortales, los efectos destructivos de las inundaciones afectan a extensas áreas del territorio y causan cuantiosos daños económicos.

Para la protección de personas y bienes frente a las inundaciones es necesario el empleo coordinado de importantes medios y recursos pertenecientes a las distintas Administraciones Públicas como recoge la legislación española de planificación de protección civil. El apartado 6 de la Norma Básica de Protección Civil, Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, determina que este riesgo será objeto de Planes Especiales en aquellos ámbitos territoriales que lo requieran. Y en su apartado 7.2 señala que los Planes Especiales se elaborarán de acuerdo con las Directrices Básicas relativas a cada riesgo.
Las medidas de prevención frente a los daños por inundación, que contemplan estos planes, se clasifican en estructurales, que consisten en la construcción o manipulación física del río y sus inmediaciones para evitar o reducir impactos, y las no estructurales que se basan en ampliar conocimientos, e informar y enseñar a la población para reducir el riesgo de un daño mayor.

Algunas de las medidas no estructurales que habitualmente se citan son: la ordenación territorial y la planificación urbanística, la predicción de inundaciones, las medidas de protección civil (concienciación, comunicación, movilización, coordinación y procedimientos de operación) y los seguros e indemnizaciones. Una herramienta básica y transversal para la aplicación de estas medidas, y que puede tener cierta relevancia en el diseño de medidas estructurales, son las plataformas de alerta temprana y de gestión de avenidas.

La Oficina para la Reducción de Riesgos de Desastre de Naciones Unidas (UNDRR), dentro de su Marco Sendai para 2015-2030, aprobado en la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres, indica que ya que el riesgo depende de los patrones locales de exposición, vulnerabilidad, capacidades adaptativas y resiliencia, y que los perfiles de riesgo pueden cambiar en el tiempo, y es a escala local donde esos cambios se perciben de forma directa. Por este motivo, es de gran importancia que los actores locales, y entre ellos los gobiernos locales, formen parte de los procesos de planificación frente a los riesgos (UNDRR, 2019).

Por tanto, la administración local debería participar en la elaboración y tener acceso a las plataformas de alerta temprana, como soporte al resto de medidas a utilizar para reducir los riesgos de inundación.

2. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS POR INUNDACIÓN EN ESPAÑA

Habitualmente se entiende por riesgo la combinación de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición. En este ámbito, la peligrosidad se refiere la probabilidad de ocurrencia de un determinado nivel de inundación en cierto periodo de retorno en un área del territorio determinada. La vulnerabilidad se define como el grado de daño esperado frente a determinado nivel de inundación, y es intrínseca a la infraestructura, independientemente de que se produzca o no el evento. La exposición, es el conjunto de personas, bienes, servicios y procesos expuestos a la acción de un peligro, y se expresa cuantitativamente en el número de elementos potencialmente afectados. Para entender la evolución del riesgo de inundación y es necesario analizar la evolución de los diferentes componentes del mismo.

Los impactos económicos debidos a las inundaciones se han incrementado durante las últimas décadas en todo el planeta (CRED y UNISDR, 2017). En Europa, y concretamente en España, donde las inundaciones son el riesgo natural más importante por los daños causados, también se verifica con claridad esta tendencia.

Utilizando como indicador los datos del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS, 2019) para la serie 1971-2019, se observa un incremento constante en el número de expedientes tramitados por daños por inundación, así como una tendencia creciente en las indemnizaciones, si bien con variaciones notables entre años en función de la severidad de los eventos de avenida (Fig. 1).

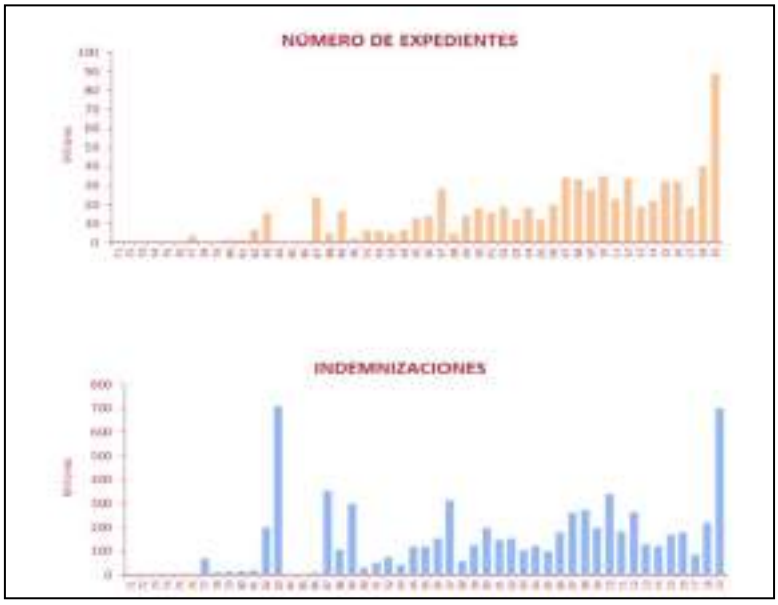


Figura 1. Número de expedientes tramitados (arriba en naranja) y valor indemnizado en millones de euros (abajo en azul) por el Consorcio de Compensación de Seguros para la serie 1971-2019. Fuente: CCS, 2019.

El origen meteorológico de las inundaciones por avenida en España está asociado a situaciones de depresión aislada en niveles altos (DANA) o bien en otros fenómenos como depresiones que llegan a la superficie, las típicas borrascas o inundaciones producidas por fenómenos convectivos. Las DANAs son el factor de inundación más significativo en las comunidades autónomas de Murcia, Comunidad Valenciana, Cataluña e Islas Baleares (Fig. 3), y se concentran en septiembre y octubre.

Especialmente destacable es el evento tipo DANA de septiembre de 2019, que afectó principalmente a la Vega Baja del Segura que es el sinestro con mayor número de tramitaciones en la historia del CCS y el segundo en cuantía económica total (Espejo y Soriano, 2019).



Figura 2. Número de expedientes por daños a personas por el Consorcio de Compensación de Seguros para la serie 1987-2019. Fuente: elaboración propia a partid de los datos de CCS, 2019.

Estas cifras ponen de manifiesto que, a pesar de los esfuerzos que se realizan desde la Administración para la prevención y la disminución de daños causados por las avenidas, los daños continúan

aumentando. Uno de los argumentos que se esgrimen habitualmente para justificar esta tendencia es el del aumento de la peligrosidad por incremento de la torrencialidad debido al cambio climático.

Sin bien, existe cierta unanimidad en considerar que los efectos del cambio climático están causando y causarán un aumento de la temperatura y una disminución de las escorrentías medias en las regiones mediterráneas (AEMET, 2015; CEDEX, 2017; IPCC, 2013; Marcos y Pulido, 2017; MITECO, 2018), no está tan claro los efectos sobre la torrencialidad. El IPCC (2013) manifiesta que "*existe un nivel de confianza bajo en que se han producido tendencias a gran escala en la actividad tormentosa durante el último siglo y todavía no hay pruebas suficientes para determinar si existen tendencias sólidas en cuanto a fenómenos meteorológicos severos en pequeña escala, como granizadas o tormentas*".

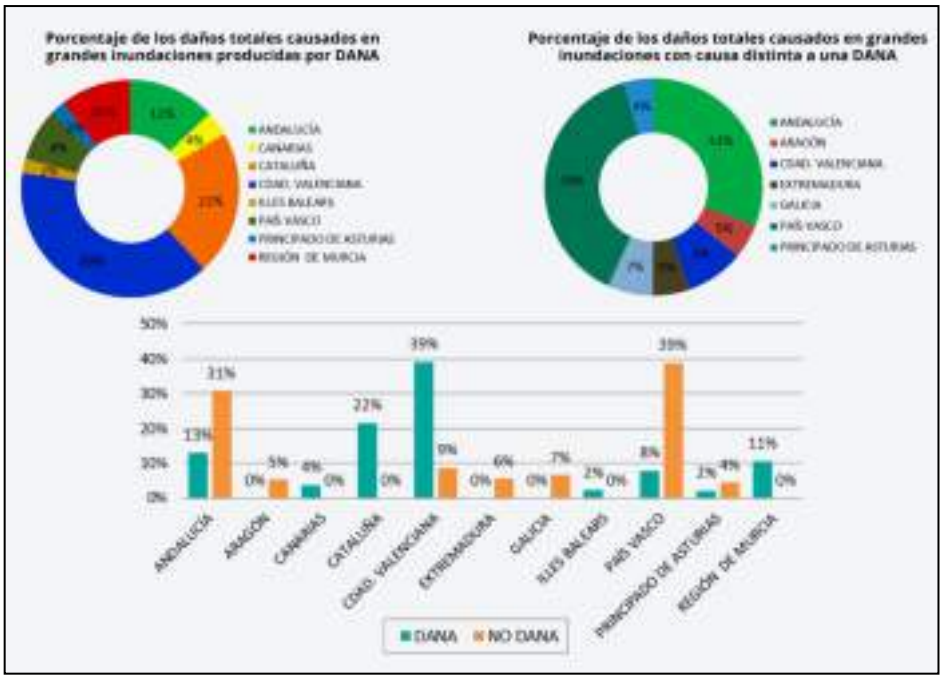


Figura 3. Porcentajes de daños totales causados por inundaciones producidas por episodios de tipo DANA y por otros tipos de episodios por comunidades autónomas. Fuente: Espejo y Soriano, 2019.

Sí se han producido cambios en la estructura de la precipitación máxima, pero aún existen muchas incertidumbres en su estudio (MIMAM, 2018), y parece que estos están asociados a una menor regularidad estacional y a un aumento moderado de los episodios de lluvia intensa (Olcina y Baños, 2019), pero no a valores récord de lluvia torrencial.

Por esta razón, no parece considerar que el cambio climático sea el factor fundamental en los mayores daños por inundación a los efectos del cambio climático durante las últimas décadas. Así lo contemplan numerosos estudios (Pielke et al. 2005; Barredo, 2009; Bower, 2011; Barredo *el al.*, 2012) que consideran que el aumento en daños por inundación no se debe al aumento de la peligrosidad, sino que se debe principalmente a una mayor vulnerabilidad y exposición (Olcina *et al.*, 2017).

3. MARCO LEGAL EN ESPAÑA

Aunque hay constancia histórica de las inundaciones en todo el territorio español, la normativa que contempla su gestión es relativamente reciente. Desde finales del siglo XIX se ha ido produciendo

una ocupación más intensiva de las zonas inundables, que se dispara durante las décadas de los años 60 y 70 cuando comienza una gran expansión urbanística que ocupa las vegas bajas de la mayor parte de los ríos españoles, mientras que la protección de avenidas presentaba una estructura arcaica (Mateu y Camarasa, 2000).

Las inundaciones producidas durante los años 80 van favoreciendo un cambio en la percepción sobre protección de avenidas. La Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas incorpora ya, aunque tímidamente, una referencia a las inundaciones, indicando que los Planes Hidrológicos de cuenca comprenderán "*los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos"* (Art. 40.l).

Por su parte el Artículo 9 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/86, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico que desarrolla los títulos Preliminar, I, IV, V, VI Y VII de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas), considera ya que en *"zonas o vías de flujo preferente sólo podrán ser autorizadas aquellas actividades no vulnerables frente a las avenidas y que no supongan una reducción significativa de la capacidad de desagüe de dichas zonas"*. Asimismo, sienta las bases para la delimitación de estas zonas, considerando que son la unión de la zona o zonas que concentran el flujo en avenida junto a las que para avenidas de periodo de retorno 100 años satisfagan uno o más de los criterios: calado > 1m; velocidad > 1 m/s; o, (calado x velocidad) > 0,5 m^2/s.

La Norma Básica de Protección Civil, aprobada por el Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, que desarrolla la Ley 2/1985, de 21 de enero, de Protección Civil, incluye entre los planes especiales de protección civil a elaborar por la Administración General del Estado y por las comunidades autónomas, los correspondientes al riesgo por inundación.

Bajo el paraguas de esta legislación aparece la primera disposición que relaciona expresamente el nivel de riesgo de inundación del territorio con la planificación territorial y los usos del suelo, en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones, aprobada por acuerdo de Consejo de Ministros de 9 de diciembre de 1994.

Si bien esta directriz del 1994 ya incluye el concepto de la necesaria planificación territorial, no es hasta 1998 con la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre Régimen del Suelo y Valoraciones, cuando se comienza a establecer explícitamente limitaciones en relación a los riesgos naturales, si bien, la ausencia de la cartografía y estudios de evaluación del riesgo limitaron sus efectos positivos (Marquínez *el al.*, 2017). Así muchos municipios comenzaron a tramitar sus instrumentos de planificación a partir de 1998, con lo que no hubo tiempo de incorporar los riesgos de inundación. Este es el caso, por ejemplo, de la Comunidad Valenciana donde muchos planes se aprobaron entre 1998 y 2002, antes de que entrara en vigor el Plan de Acción Territorial sobre prevención de riesgo de inundación (PATRICOVA). Incluso, con posterioridad a su entrada en vigor no fue tenido en cuenta ya que los planes municipales que no estaban aún aprobados habían comenzado su tramitación con anterioridad a la vigencia del PATRICOVA (Biener y Prieto, 2019).

Un cambio importantísimo es la llegada de la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación cuyo comienzo es revelador: "*las inundaciones pueden provocar víctimas mortales, el desplazamiento de personas, causar daños al medio ambiente, comprometer gravemente el desarrollo económico y debilitar las actividades económicas de la Comunidad. Las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse. No obstante, algunas actividades humanas (como el incremento de los asentamientos humanos y los bienes económicos en las llanuras aluviales y la reducción de la capacidad natural de retención de las aguas por el suelo) y el cambio climático están contribuyendo*

a aumentar las probabilidades de que ocurran, así como su impacto negativo."

Esta directiva se trasladó con gran agilidad a la legislación española, modificando el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 9/2008, del 11 de enero), y trasponiendo la directiva en el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio que la traspone al ordenamiento español. Por último, el Real Decreto 638/2016 que termina el desarrollo del Texto Refundido de la Ley de Aguas de 2001 incorpora algunas limitaciones a los usos en las zonas de flujo preferente y en las zonas inundables.

La evolución de la normativa, que partía del simple concepto de protección frente a daños y de cierta planificación por parte de los organismos de cuenca, supone un cambio a un enfoque más integral que implica, además de a la administración hidráulica, a las administraciones autonómicas, a través de los planes de actuación territorial que requieren cartografías de peligrosidad y riesgo, y a las administraciones locales, responsables de incorporar la prevención frente a las avenidas en su planificación urbanística.

4. PLATAFORMAS DE ALERTA TEMPRANA Y GESTIÓN DE INUNDACIONES

Los sistemas de alerta temprana para inundaciones (Flood Early Warning Systems) son un elemento fundamental de las estrategias de gestión de riesgos ante desastres. La Oficina para la Reducción de Riesgos de Desastre de Naciones Unidas (UNDRR) aboga por un incremento en su disponibilidad para alcanzar los objetivos de su estrategia Sendai de reducción de riesgos y desarrollo sostenible (UNDRR, 2019). A escala europea y nacional, tanto en la Directiva 2007/60/CE, como en el Real Decreto 903/2010 que la traspone, se contempla su necesidad: *"los planes de gestión del riesgo de inundación abarcarán todos los aspectos de la gestión del riesgo de inundación, centrándose en la prevención, protección y preparación, incluidos la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana, y teniendo en cuenta las características de la cuenca o subcuenca hidrográfica considerada"*.

El objetivo principal de estos sistemas es proveer a las personas y comunidades amenazadas por los riesgos de inundación de protocolos de actuación para reducir los riesgos de daños a personas o a los bienes. Para que estos sistemas tengan éxito es imprescindible implicar a un grupo de actores tan amplio como sea posible (NOAA y COMET, 2010; UNISDR, 2006), en función de las características locales. Dentro del grupo de implicados cuya participación debería valorarse están:

Administraciones públicas: el Gobierno nacional responsable de las políticas, marcos normativos y de la gestión de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias; la AEMET; Protección Civil; las Comunidades Autónomas, responsables de los Planes Especiales frente al riesgo de inundaciones, y de la homologación de los Planes de Actuación Municipal por parte de las comisiones de Protección Civil; la Administración Local, que está en una posición central para la efectividad de las plataformas de alerta temprana (UNISDR, 2006), ya que los municipios son los responsables de las aprobaciones de los planes de actuación municipal, tienen un buen conocimiento de los riesgos en su territorio y pueden formar e informar a la población local con la mayor agilidad.

Organismos no gubernamentales, que pueden jugar un papel importante en la concienciación de la población, en el suministro de información para las plataformas de alerta temprana y en el impulso para que la protección frente a inundaciones permanezca en la agenda política.

El sector privado, que puede tener servicios especializados para proveer asesoría, asistencia en el terreno en caso de desastres o bienes y servicios, además de extender los protocolos de defensa a sus propias organizaciones.

La comunidad científica y académica que tiene un papel crítico, siendo quien provee del conocimiento científico-técnico a la sociedad para la implementación, actualización y mejora de estos sistemas.

Las comunidades y los ciudadanos, particularmente aquellos más vulnerables son fundamentales para que los sistemas de alerta temprana estén orientados a las personas. Resulta conveniente la aplicación de metodologías específicas para implicar a los ciudadanos (y al resto de actores) en procesos de participación pública y co-creación (Dabrowski *et al.*, 2019).

Los elementos básicos interrelacionados (Fig.4) que comprende una plataforma de alerta temprana frente a inundaciones en un área determinada son (Bertule *et al.*, 2017; UNISDR, 2006; Perera *el al.*, 2020):

Conocimiento y evaluación de los riesgos de inundación en la zona
Monitorización de riesgos locales (predicciones) y sistema de alertas
Servicio de comunicación sobre riesgo de inundación
Capacidades de respuesta comunitarias (Perera *el al.*, 2020):

Respecto al conocimiento de los riesgos, es importante destacar que es imprescindible realizar el análisis de peligrosidad junto con el de vulnerabilidad/exposición, a partir de una recopilación sistemática y un análisis de los datos. La carencia de este conocimiento cuando se aprobó la Ley 6/1998 del Suelo, dificultó la incorporación de los riesgos de inundación en los planes de ordenación urbana. Sin embargo, en la actualidad ya se han desarrollado las cartografías requeridas y es el momento de incorporarlas en el ámbito local de planificación.

La monitorización de riesgos locales, los sistemas de alerta y los protocolos de respuesta son aspectos que, aunque sin estar necesariamente integrados en sistemas de alerta temprana, llevan desarrollándose por las administraciones públicas desde finales de los años 80, en especial en forma de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) por parte de la Confederaciones Hidrográficas y de los diferentes medios de predicción meteorológica de la AEMET.

Este tipo de plataformas pueden tener diferentes grados de complejidad en función de las disponibilidades de datos, la tecnología empleada y el conocimiento. La incorporación de nuevas tecnologías y el avance en otras, como la teledetección, la inteligencia artificial, las tecnologías de la información, las redes sociales, etc. están teniendo un efecto multiplicador sobre las capacidades de estos sistemas



Figura 4. Elementos que configuran un sistema de alerta temprana. Fuente: elaboración propia a partir de UNISDR (2006) y NOAA y COMET (2010).

5. EVOLUCIÓN DEL PAPEL DE LAS ADMINISTRACIONES LOCALES EN LAS NUEVAS ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN Y ALERTA TEMPRANA

Como ya se ha expuesto anteriormente, hasta el comienzo del siglo XXI no ha habido en España un marco para la planificación integral de defensa contra las inundaciones apoyada en la gestión del territorio.

A falta de esta estrategia integral, durante las dos últimas décadas del siglo XX se realizaron numerosas obras de protección y encauzamiento, comenzó la implantación de los SAIH y mejoraron las predicciones de AEMET. Probablemente estos factores han sido responsables de que los daños a las personas no hayan aumentado, a pesar del ya citado aumento de la vulnerabilidad y la exposición.

Sin embargo, se da la paradoja de las obras de encauzamientos realizados, si bien reducen las consecuencias de los eventos relativamente frecuentes, pueden aumentar la vulnerabilidad frente a los eventos mayores por la falsa sensación de seguridad que generan, que hace que se ocupen las zonas inundables (Marquínez *et al.*, 2017). Cuanto más alto es el nivel de protección ante eventos frecuentes, los eventos más catastróficos, con periodos de retorno iguales o superiores a 100 años, pueden tener efectos devastadores sobre las vidas humanas, infraestructuras y viviendas, y llegar incluso al colapso social (Kates et al., 2006).

Ante la constatación de esta paradoja, la estrategia actual de protección, que queda clara en la Directiva 2007/60/CE, pasa por *"dar más espacio a los ríos"* y por establecer planes de gestión del riesgo de inundación que incluyen *"la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana"*.

El papel de la Administración Local ha seguido, como es lógico, una evolución paralela a estos cambios de paradigma en la gestión. Desde participar en las obras de encauzamiento y ser beneficiaria de las actuaciones de la Confederaciones Hidrográficas, hasta tener que incluir la prevención frente a inundaciones en su planificación urbanística y tener que redactar los Planes de Actuación Municipal frente al riesgo de inundaciones.

En el caso de la Comunidad Valenciana se dispone de un Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), aprobado en 2003 y revisado en 2015, y del Plan Especial frente al riesgo de Inundaciones, cuya última revisión es de 2018, que es Plan Director de la planificación territorial de ámbito inferior que se elabore en la Comunidad Valenciana.

1. FUNDAMENTOS
1.1. Objetivo
1.2. Ámbito
1.3. Marco Legal y Competencial
1.4. Glosario

2. ANÁLISIS DEL RIESGO
2.1. DESCRIPCIÓN DEL TÉRMINO MUNICIPAL
2.2. ANÁLISIS DEL RIESGO
2.2.1. Pluviometría
2.2.2. Inundaciones históricas
2.2.3. Descripción del tipo de riesgo por cuencas/subcuencas/zonas
2.2.4. Red de acequias y alcantarillado
2.3. ANÁLISIS DE LAS CONSECUENCIAS. ZONAS DE RIESGO ALTO, MEDIO Y BAJO
2.3.1. Suelo residencial: viviendas y personas afectadas
2.3.2. Establecimientos industriales y comerciales
2.3.3. Equipamientos
2.3.4. Infraestructuras

3. ESTRUCTURA Y ORGANIZACIÓN DEL PLAN
3.1. Esquema organizativo
3.2. CECOPAL
3.3. El Director del Plan
3.4. El Comité Asesor
3.5. El Gabinete de Información
3.6. El Centro de Comunicaciones
3.7. El Puesto de Mando Avanzado
3.8. Las Unidades Básicas
3.9. El Centro de Recepción de Medios (CRM)
3.10. Voluntariado
3.11. Centro de Coordinación de Emergencias
3.12. Planes de Emergencia de Presa/Balsa

4. OPERATIVIDAD
4.1. Predicción de fenómenos meteorológicos adversos
4.2. Notificación
4.3. Clasificación de emergencias: fases de Preemergencia, Emergencia y Vuelta a la Normalidad
4.4. Procedimiento de Actuación
4.5. Vuelta a la normalidad

5. IMPLANTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA OPERATIVIDAD
5.1. Implantación
5.2. Mantenimiento de la operatividad

ANEXOS I. Aprobación y homologación del Plan II. Catálogo de Medios y Recursos III. Directorio IV. Cartografía. Puntos Críticos V. Seguimiento. VI. Consejos a la población VII. Protocolo de Actuación Municipal por accidente o rotura en Presa / Balsa

El PATRICOVA es una herramienta de planificación territorial de gran utilidad (Fig. 6), pero, como se explicó anteriormente (ver apartado 3), al no estar disponible cuando se aprobó la Ley del Suelo, muchos planes de ordenación urbana no lo incorporan.

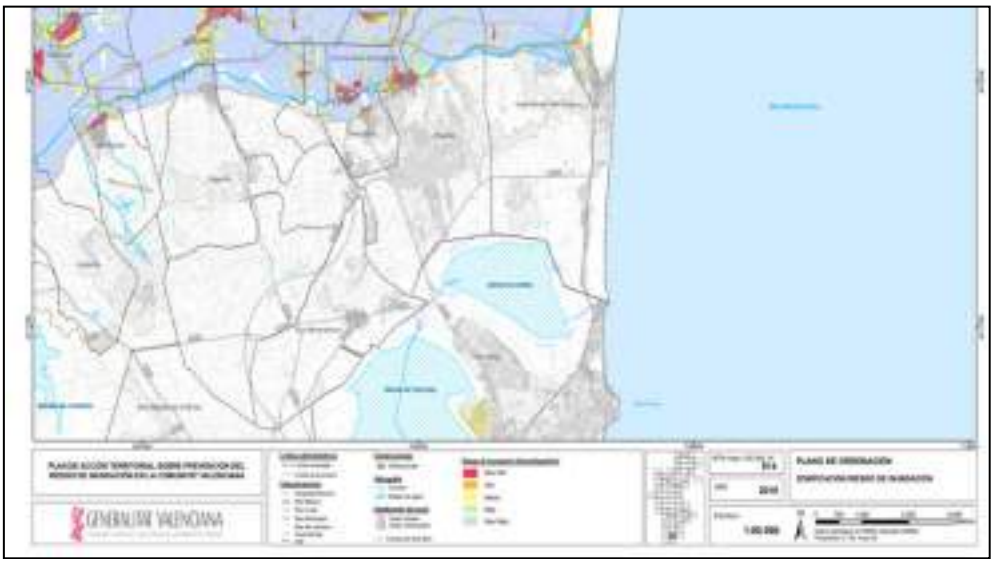


Figura 6. Aspecto de la cartografía con la zonificación del riesgo de inundación que aporta el PATRICOVA (GVA, 2015).

El Plan Especial ante inundaciones establece el contenido mínimo de los Planes de Actuación Municipales ante inundaciones (Fig. 5) y define la integración en estos de los planes ante rotura de presas o balsas. Por tanto, existe una clara competencia municipal en la elaboración de los planes de actuación.

Estos planes tienen que contemplar como parte de su contenido los elementos principales de los sistemas de alerta temprana (Fig.4) tanto el análisis de riesgos, como dentro la su operatividad la predicción (gracias al acceso a la información de la AEMET, a través de Meteoalerta), las actuaciones en situación de premergencia, emergencia y vuelta a la normalidad, las medidas de protección a la población, y los canales de comunicación de las emergencias.

Aunque el contenido de estos planes parece adecuado para el establecimiento de una gestión moderna de este tipo de eventos, se encuentran todavía graves deficiencias:

Actualmente es bajo el porcentaje de municipios que, por ser de riesgo, están obligados a tener el plan de actuación. Para la Comunidad Valenciana tan sólo un 25% de los municipios disponen de los citados planes de actuación.

Los recursos de los municipios son, en general, muy limitados para acometer este tipo de estudios y mantener los equipos necesarios para la ejecución de los planes cuando se presente la necesidad.

Los planes no contemplan herramientas software para gestionar toda la información de forma coherente y sistemática, lo que en la práctica limita su aplicabilidad.

Hasta que los análisis de riesgos realizados no se incorporen en la planificación urbanística, será difícil revertir la tendencia de aumento de vulnerabilidad y exposición.

Para salvar estas dificultades las Diputaciones Provinciales pueden ser de utilidad, vertebrando

diferentes iniciativas municipales, dando soporte técnico o implantando herramientas que, debido a economía de escala, no sería posible hacer de forma aislada en los municipios. Además, desde las Diputaciones se pueden impulsar proyectos que colateralmente mejoren la protección del territorio frente a las avenidas. Es el caso, por ejemplo, de la revalorización de la agricultura tradicional en la comarca de la Vega Baja que en la actualidad se está impulsando desde la Diputación de Alicante gracias al proyecto WaVE Interreg (https://www.interregeurope.eu/wave/).

En definitiva, el papel de la Administración Local, que como se advierte desde los grupos de expertos debe ser fundamental en la gestión de los riesgos de inundaciones (UNDRR, 2019), aunque ya cuenta en España con un marco normativo apropiado, necesita ser reforzado y puesto en marcha, tal vez con el apoyo de administraciones de mayor tamaño como las Diputaciones, para lograr el objetivo de una planificación del territorio compatible con la disminución de riesgos por inundación.

6. PUESTA EN MARCHA DE LA PLATAFORMA DE ALERTA TEMPRANA Y GESTIÓN DE INUNDACIONES DE LA DIPUTACIÓN DE ALICANTE

Durante los últimos años la provincia de Alicante se ha visto afectada por diferentes eventos hídricos extremos, con periodos de escasez muy pronunciada, así como con eventos de inundaciones de gran magnitud. Especialmente significativos fueron los episodios de inundaciones en agosto y septiembre de 2019, especialmente este último, que castigaron de manera especial a la zona de la Vega Baja alicantina.

Como ya se ha indicado, es imprescindible que la Administración Local tenga un papel activo en la gestión las inundaciones para aumentar la resiliencia ante estos episodios, así como un incremento de la capacidad de gestión ante este tipo de eventos.

Asimismo, la «Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible» aprobada por las Naciones Unidas, incide en la necesidad de promover aquellas actuaciones que contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejore progresivamente la calidad de la tierra y el suelo. Como uno de los mecanismos para lograr estos objetivos, la Agenda 2030 promueve el uso de las alianzas, tanto con el sector público como con el sector privado (Objetivo 17). En relación con este último punto, las Nacionales Unidas «exhorta a todas las empresas a que aprovechen su creatividad e innovación para para resolver los problemas relacionados con el desarrollo sostenible» (Objetivo 17).

Alineándose tanto con los objetivos como con la conveniencia de alianzas, en 2020 se ha firmado un convenio entre la Diputación de Alicante y SUEZ Spain que tiene como objetivo que ambas partes colaboren en un análisis de la resiliencia de los sistemas e infraestructuras existentes, que facilite su adaptación al objeto de prevenir los devastadores efectos que causan fenómenos meteorológicos extremos como los que padeció la provincia de Alicante durante los meses de agosto y septiembre de 2019.

Se trata de implantar en la Diputación de Alicante la plataforma Smart River Basin (Cuencas Fluviales Inteligentes), que incluye una plataforma de alerta temprana y gestión de inundaciones, desarrollada por SUEZ, y que, permitirá proporcionar información valiosa para optimizar la respuesta de los municipios pertenecientes a la comarca de la Vega Baja ante episodios hídricos extremos.

La implantación de Smart River Basin servirá para:

Analizar las principales infraestructuras de defensa existentes en la actualidad para proteger/mitigar

los efectos de las inundaciones sobre los núcleos de población, así como evaluación de posibles medidas alternativas que mejoren la resiliencia de la zona frente a estos episodios extremos.

Desarrollar de un Sistema de Alerta Temprana, que permita obtener previsiones adaptadas a las singularidades de la Vega Baja, y mejorar así la capacidad de respuesta ante este tipo de eventos.

Implantar de un Sistema de Gestión de Información hídrica que permita mejorar el conocimiento de los diferentes sistemas de explotación existentes, permitiendo así optimizar el comportamiento frente a situaciones de escasez.

La implantación de la plataforma en la Diputación tendrá ventajas directas sobre la gestión de los municipios. Ya en fase de implantación obliga a los municipios a una reflexión sobre sus infraestructuras más vulnerables, que facilita que se incorpore este concepto a su planificación propia, y sobre las infraestructuras de defensa, cuyo mantenimiento, bien por parte del ayuntamiento, bien por parte del organismo de cuenca en respuesta de las peticiones municipales, se podrá priorizar según su criticidad. Además, la generación de mapas específicos para el municipio ante diversos escenarios servirá de base para el análisis de la exposición, y una mejor estimación del riesgo.

Una vez implantada la herramienta, permite el acceso de forma unificada a toda la información que es necesario considerar tanto para la planificación como para la gestión de eventos extremos. Para la planificación toda la información de cartografías de riesgos, vulnerabilidades y efectos ante diversos escenarios resulta imprescindible en la elaboración de los planes de ordenación municipales. Para la gestión de los eventos se va a disponer de una plataforma que unifica los datos de diversas fuentes de información, de forma que se pueden lanzar alertas en función de los datos meteorológicos reales o predichos y de los caudales circulantes. Algunas horas o minutos de anticipación pueden ser críticos para la protección de las personas y de los bienes (Marquínez, 2017).

Uno de los problemas relatados por distintas corporaciones municipales durante las inundaciones de septiembre 2019 fue la imposibilidad de recibir información actualizada, ya que la capacidad de respuesta de la Confederación estuvo desbordada y sus servidores fueron incapaces de atender el alto volumen de solicitudes externas. Con el acceso directo a la información por medio de la plataforma, sería sencillo evitar estos problemas en eventos futuros.

La plataforma, además de los elementos de predicción y de alerta temprana, que no se limitan a fenómenos de inundación, sino que incluyen otras situaciones climáticas o hidrológicas extremas, permitirá realizar análisis sobre la situación hídrica de la comarca para servir de apoyo en la toma de decisiones.

Una de las ventajas de la implantación del sistema será mejorar la agilidad en la gestión municipal. La cercanía de la Diputación a los municipios permitirá que estos se beneficien directamente de la plataforma, además, de sentar un entorno común de acceso a las previsiones y análisis de riesgos, que facilitará las comunicaciones entre organismos y hacia la sociedad civil.

7. CONCLUSIONES

Las inundaciones debidas a eventos de precipitación intensa son la primera causa de daños por catástrofes naturales en España, siendo las de tipo DANA la principal amenaza para las zonas del arco mediterráneo. Las medidas de protección que se han ido ejecutando por parte de las administraciones no han tenido como resultado un descenso de la siniestralidad. Inicialmente estas medidas se centraban en actuaciones estructurales, que, si bien pueden resolver problemas importantes, causan una falsa sensación de protección que favorece la ocupación de zonas inundables, agravando, a la larga el problema.

La Directiva 2007/60/CE, incorporada al ordenamiento jurídico español con gran rapidez, pone el acento en las medidas no estructurales, obliga al establecimiento de planes de gestión del riesgo de inundación que incluyen la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana, elementos que también son considerados clave por los organismos internacionales de gestión de desastres pertenecientes a la Organización de las Naciones Unidas.

La Administración Local debe ser un actor fundamental en la gestión de avenidas. Probablemente, el no haberlo sido suficientemente en el pasado es una causa directa del aumento de la siniestralidad. Como tal, deberá estar implicada directamente en el diseño, implantación y operación de sistemas de alerta temprana y de gestión de inundaciones.

Desde la Diputación de Alicante, y por medio de un esquema de colaboración público-privada con el grupo SUEZ Spain, está poniendo en marcha un sistema de alerta temprana y de gestión de avenidas en la Vega Baja, comarca de la provincia de Alicante más afectada por las inundaciones, que permitirá la implicación de las corporaciones municipales en la gestión de episodios de inundación.

REFERENCIAS

- Barredo, J. I. (2009). Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 97-104.
- Barredo, J. I., Saurí, D. y Llasat, M. C. (2012). Assessing trends in insured losses from floods in Spain 1971–2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1723-1729.
- Bertule, M., Rosendahl, L., Spensley, J. Meltofte, S. L. y Naswa, P. (2017). *Climate change adaptation technologies for water. A practitioner's guide to adaptation technologies for increased water sector resilience*. UN Environment – DHI Centre, Climate Technology Centre and Network (CTCN) and the UNEP DTU Partnership. http://www.unepdhi.org/publications.
- Biener Camacho, S. y Prieto Cerdán, A. (2019). Inundaciones de septiembre de 2019 en la Vega Baja del Segura: causas y consecuencias. *Canelobre: Revista del Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil-Albert*, 70, 30-45.
- Bouwer, L. M. (2011). Have Disaster Losses Increased Due to Anthropogenic Climate Change?. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 39-46. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3092.1
- CCS (2019). *Estadística riesgos extraordinarios. Serie 1971-2019*. Consorcio de Compensación de Seguros, Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. https://www.consorseguros.es/web/documents/10184/44193/WEB-Estadistica_RREE_2018.pdf/14ca6778-2081-4060-a86d-728d9a17c522
- CRED y UNISDR (2017). *Economic Losses, Poverty & Disasters 1998-2017*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) y UN Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf
- Dabrowski, M., Piskorek, K., Fernández-Maldonado A. M., van der Toorn Vrijthoff, W. y Nadin, V. (2019). Methodology for the engagement of Local Stakeholder Groups (LSG). Wave Interreg Europe, Delft University of Technology. https://www.interregeurope.eu/fileadmin/user_upload/tx_tevprojects/library/file_1572188161.pdf
- DGPCE (2020). *Fallecidos por riesgos naturales en España en 2019*. Dirección General de Protección Civil y Emergencias, Ministerio del Interior, Gobierno de España. http://www.proteccioncivil.es/documents/20486/157246/FALLECIMIENTOS+POR+RIESGOS+NATURALES+2019.pdf
- Espejo Gil, F. y Soriano Cavero, B. (2019). *Comparativa de la siniestralidad asumida por el CCS por las inundaciones más significativas: el peso relativo de las danas.* Consorseguros, 11. http://www.consorsegurosdigital.com/es/numero-11/portada/

- GVA (2015). *Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana* (PATRICOVA). http://politicaterritorial.gva.es/es/web/planificacion-territorial-e-infraestructura-verde/patricova-plan-de-accion-territorial-de-caracter-sectorial-sobre-prevencion-del-riesgo-de-inundacion-en-la-comunitat-valenciana
- GVA (2018). *Plan Especial frente al riesgo de Inundaciones*. http://www.112cv.gva.es/es/el-plan-especial-frente-al-riesgo-de-inundaciones
- IFRC (2018). *Informe mundial sobre desastres*. Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. https://media.ifrc.org/ifrc/wp-content/uploads/sites/5/2018/10/B-WDR-SP%20web.pdf
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. En: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kates, R. W., Colten C. E., Laska, S. y Leatherman S. P. (2006). Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A research perspective. *PNAS*, 103, 40, 14653-14660. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0605726103
- Marcos-García, P. y Pulido-Velazquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación?. *Ingeniería del agua*, 21, 1, 35-52. https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361.
- Marquínez, J., Fernández-Iglesias, E., Colina-Vuelta, A. y García de la Fuente, L. (2017). Resiliencia territorial ante catástrofes en el cantábrico español. *Revista de Obras Públicas*, 3587, 54-63. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2017/2017_mayo_3587_06.pdf
- MITECO (2018). *Inundaciones y cambio climático*. Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid.
- Mateu Bellés. J. F. y Camarasa Belmonte, A. M. (2000). Las inundaciones en España en los últimos veinte años. Una perspectiva geográfica. *Serie Geográfica*, 9, 11-15.
- NOAA y COMET (2010). *Flash Flood Early Warning System Reference Guide 2010. University Corporation for Atmospheric Research*. http://www.meted.ucar.edu/hazwarnsys/haz_fflood.php
- Olcina Cantos, J. y Baños Castiñeira, C. J. (2019). El agua que llueve: diversidad territorial, riesgos y cambios. *Canelobre: Revista del Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil-Albert*, núm. 70, 19-29.
- Olcina Cantos, J., Pérez Morales, A., Rico Amorós, A. M., Gil Guirado, S. y López Martínez, F. (2017). La importancia de la vulnerabilidad y la exposición en el aumento del riesgo de inundaciones en el litoral mediterráneo. *Consorseguros*, 7, 1-23.
- Perera, D., Seidou, O., Agnihotri, J., Mehmood, H. y Rasmy, M. (2020). Challenges and Technical Advances in Flood Early Warning Systems (FEWSs). *Flood Impact Mitigation and Resilience Enhancement*. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93069
- Pielke, R. A. Jr. *et al.* (2005). Clarifying the attribution of recent disaster losses: A response to Epstein and McCarthy. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 1481-1483.
- Thielen del Pozo, J., Thiemig, V., Pappenberger, F., Revilla-Romero, B., Salamon, P., De Groeve, T. y Hirpa, F. (2015). *The benefit of continental flood early warning systems to reduce the impact of flood disasters*. Joint Research Centre, the European Commission. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97266/lbna27533enn.pdf
- UNDRR (2019). *Words into action. Local disaster risk reduction and resilience strategies. Engaging for resilience in support of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. https://www.preventionweb.net/files/65095_65095wianationaldrrstrategies100520.pdf
- UNISDR (2006). *Developing Early Warning Systems: A Checklist. United Nations International Strategy for Disaster Reduction*. EWC III Third International Conference on Early Warning. http://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/checklist/English.pdf
- UNISDR (2019). *Words into Action guidelines: Implementation guide for local disaster risk reduction and resilience strategies*. https://www.preventionweb.net/publications/view/57399

EL RIESGO DE INUNDACIÓN EN RAMBLAS Y BARRANCOS MEDITERRÁNEOS

Ana Mª Camarasa-Belmonte
Depto. Geografía, Universitat de València, España
ana.camarasa@uv.es
https://orcid.org/0000-0001-7173-5344

RESUMEN

Ramblas y barrancos conforman cursos fluviales habituales en el ambiente mediterráneo, que conllevan un nivel importante de riesgo de inundación. Sin embargo, durante mucho tiempo, estos sistemas han sido infra-considerados, como consecuencia de un desconocimiento acusado de su funcionamiento hidrogeomorfológico. A día de hoy la legislación europea sobre inundaciones admite el peligro que suponen y reconoce la necesidad de incrementar su comprensión y conocimiento, adecuando la escala y los objetivos de trabajo a sus particularidades. A partir de la recopilación de diversos casos de estudio de crecidas en ramblas de la Comunidad Valenciana (y otros entornos mediterráneos), el presente trabajo plantea las cuestiones clave que caracterizan los procesos de conversión lluvia-caudal y generación de crecidas en rambla, atendiendo a su especificidad hidrogeomorfológica. Así mismo, se abordan las consecuencias que podrían suponer para este tipo de crecidas las condiciones de cambio ambiental, en sus múltiples facetas: climático, antrópico y geomorfológico. Para ello, se parte de la evolución reciente de episodios pluviométricos hidrológicamente significativos en la Demarcación Hidrológica del Júcar, en relación con su capacidad morfogenética.

1. INTRODUCCIÓN

De todos es conocido que las inundaciones constituyen el riesgo natural más extendido del planeta. En el caso de España, la Comunidad Valenciana está especialmente expuesta a este fenómeno, como lo demuestra el hecho de que, según el Consorcio de Compensación de Seguros, ocupe el primer puesto del país en pérdidas económicas por inundación. Su ubicación en una zona de transición entre los climas áridos del sur y húmedos del norte, su topografía contrastada, la torrencialidad del clima y la proximidad del mar Mediterráneo propician el desencadenamiento de episodios lluviosos de gran intensidad que, a menudo, originan crecidas e inundaciones.

La planificación hidrológica siempre ha contemplado este riesgo como significativo aunque, desde principios de siglo, se observa un cambio importante de paradigma. A finales del siglo XX, la previsión se focalizaba, sobre todo, en los grandes ríos de circulación perenne. Sin embargo, las corrientes efímeras son más frecuentes de lo que pudiera parecer, ya que, a nivel mundial, más del 50 % de la red fluvial presenta intermitencias (Skoulikidis et al., 2017). En el caso de Europa, la franja mediterránea es la más afectada, con porcentajes que pueden variar desde el 20 % para el caso de Francia (Snelder, 2013) hasta más del 90 % en Cerdeña y Sicilia (Petrakis et al., 2012). En el sudeste español, Gómez et al. (2005) estiman que más del 70 % de los cursos fluviales son ramblas. Además, cabe esperar un incremento en el número de corrientes efímeras durante el próximo siglo como consecuencia del cambio climático.

Desde las administraciones públicas, poco a poco ha ido creciendo el interés de la legislación por las

corrientes efímeras. La Directiva Marco Europea de 2007 sobre evaluación y gestión de inundaciones (trasladada a la nacional en el decreto de Protección Civil de 2010) reconoce la importancia de las "inundaciones relámpago" (*flash-floods*) y hace mención expresa del riesgo que suponen "las corrientes intermitentes del Mediterráneo". Acepta que funcionan de otra manera y, por tanto, precisan de una metodología *ad hoc*, que debe ser desarrollada a la escala "más conveniente".

Este reconocimiento constituye un primer paso para la adaptación al riesgo, porque pone de manifiesto la especificidad de la hidrología mediterránea de ramblas, que necesita ser comprendida mejor, para poder ser prevenida mejor. Como afirma Klemes (1983) "los investigadores no pueden imponer la escala pero deben buscar la más adecuada para cada proceso y tratar de entender sus relaciones y patrones de comportamiento".

Por ello, prevenir el riesgo en ramblas mediterráneas pasa por conocer la especificidad de su hidrología, entender el contexto social en el que se desarrolla, adecuar la escala de trabajo y ser capaces de proyectar su evolución futura a partir de las actuales condiciones de cambio climático y ambiental.

Este trabajo plantea algunas reflexiones en este sentido, a partir de la recopilación de diferentes estudios, llevados a cabo en ramblas valencianas y en otros sistemas similares de entornos semiáridos. El análisis se organiza en dos grandes secciones: la primera aborda los aspectos clave y específicos de la formación de crecidas en ramblas y, la segunda supone una valoración de la evolución a futuro de este tipo de crecida, en el contexto actual de cambio ambiental.

2. PARTICULARIDADES DE LA HIDROLOGÍA DE RAMBLAS Y BARRANCOS MEDITERRÁNEOS

En la región mediterránea, los ambientes de rambla participan de ciertas características climáticas, geomorfológicas y antrópicas que condicionan los procesos hidrogeomorfológicos de generación de escorrentía (Conesa, 2005). Climáticamente, son zonas de escasez pluviométrica, régimen irregular y fuerte sequía estival, sometidas a episodios estacionales de alta intensidad (Camarasa-Belmonte y Soriano, 2014). Desde el punto de vista geomorfológico, las ramblas presentan pequeñas cuencas torrenciales, labradas en litologías permeables, de grandes pendientes, corto recorrido y cauces amplios y pedregosos. Todo ello limita la cobertera vegetal de las laderas escarpadas a especies adaptadas al stress hídrico y a suelos poco desarrollados (Gómez et al., 2005). Las cuencas bajas, no obstante, han soportado, durante más de 8000 años, una ocupación humana intensa (Butzer, 2005 y nuevo), basada en la fertilidad de los sedimentos depositados durante las inundaciones (Segura, 2004).

Este entorno morfoclimático de transición, entre los más húmedos del norte y los áridos del sur, condiciona un funcionamiento hidrológico de tipo semi-árido, dominado por sucesos extremos (Brakenridge, 1988, Bracken y Crocke, 2007).

Dos características fundamentales definen los procesos hidrológicos y la formación de crecidas en ramblas mediterráneas: la intermitencia de flujos y la magnitud del episodio. Por un lado, la mayor parte del año los cauces no vehiculan agua porque están hidrológicamente desconectados de los acuíferos. Por otro, como el caudal depende casi exclusivamente de la lluvia, son las características del episodio (volúmenes acumulados e intensidad) las que condicionan la respuesta de la cuenca.

Camarasa-Belmonte (2016a) ha realizado un estudio de crecidas en cinco ramblas valencianas, a partir de 142 episodios, ocurridos entre 1989 y 2007, a cuyos resultados nos remitiremos en este trabajo, para ilustrar los siguientes apartados.

2.1. Conectividad hidrológica e intermitencia del flujo

La configuración geomorfológica de las ramblas suele estar organizada en tres sectores: (i) un sector montañoso de cabecera, de grandes pendientes y litología permeable; (ii) un sector intermedio que conecta la cabecera con la llanura litoral, donde se desarrollan amplias formas sedimentarias de transición (abanicos, piedemontes, glacis, etc.) y, (iii) la llanura de inundación en la parte baja de la cuenca. Desde el punto de vista hidrogeomorfológico, las cabeceras son los espacios donde antes se produce la escorrentía, pero una vez empieza a circular puede ser reabsorbida (*run-on*) por las formas sedimentarias del sector intermedio o por el propio cauce, mediante procesos *de transmission losses* o fugas en canal (Camarasa-Belmonte, 2016b; Costa et al., 2012).

Como ya se ha mencionado la circulación hídrica de ramblas y barrancos se caracteriza por su intermitencia. Únicamente con ocasión de episodios de cierta importancia se produce la conectividad hidráulica de la cuenca, entendida como la capacidad del agua de circular a través de las distintas unidades geomorfológicas y generar un flujo continuado hasta la desembocadura (Bracken y Crocke, 2007).

La conectividad hidrológica depende del contexto morfoclimático. Así, mientras que en ambientes templado-húmedos está muy influenciada por el flujo de base y por la humedad antecedente, en ramblas mediterráneas, sin embargo, depende fundamentalmente de la duración y de la intensidad de la lluvia, así como de las pérdidas hacia niveles subálveos, bien por reabsorción de flujos (*run-on*), bien por fugas en el canal (Yair y Kossovosky, 2002; Yair y Raz-Yassif, 2004; Camarasa y Segura, 2001; Bull y Kirkby, 2002; Costa et al., 2012).

Las ramblas mediterráneas presentan, por tanto, dos elementos importantes de discontinuidad: por una parte, la propia configuración geomorfológica de la cuenca, que favorece las pérdidas hídricas hacia niveles subálveos y, por otra, la variabilidad espacio-temporal de la tormenta.

2.2. Características y magnitud de los episodios de riesgo

Una vez establecidos los elementos espaciales de discontinuidad de la cuenca, los factores más importantes de no linealidad en la conectividad hidrológica están ligados a la magnitud de la tormenta, su ubicación espacial (Zoccatelli et al., 2011) y su evolución temporal (Camarasa-Belmonte, 2016a).

Los eventos de crecida vienen originados por episodios de lluvia capaces de generar escorrentía directa. Por ello, enfocar el análisis de crecidas a partir de datos medios anuales o mensuales no tiene sentido en un entorno como el mediterráneo, dominado por sucesos extremos (Graff, 1988; Camarasa-Belmonte y Soriano, 2014). Muy al contrario, en estos ambientes el estudio debe focalizarse en episodios concretos de cierta magnitud. Yair and Raz-Yassif (2004) en un análisis sobre la generación de escorrentía a diversas escalas en una cuenca del Neveg (Israel) llegaron a la conclusión que sólo los episodios importantes garantizaban la continuidad del flujo a escala de cuenca. Este mismo hecho ha podido ser corroborado para cuencas mediterráneas del este y sudeste peninsular (Bull et al., 1999;

Camarasa y Segura, 2001; López-Bermúdez et al., 2002; Cammeraat, 2004). En este sentido, Camarasa y Tilford (2002), en un estudio sobre modelos de conversión lluvia-caudal en ramblas, distinguen dos tipos de episodio en función de su magnitud, llegando a la conclusión que los modelos simples de transferencia funcionaban mucho mejor cuando se calibraban en episodios de alta energía.

El problema aparece al tratar de definir la magnitud de un episodio y qué indicadores deben de tenerse en cuenta. Según Camarasa-Belmonte y Soriano (2014), en ambientes mediterráneos no sólo es importante cuánto llueve, sino cómo llueve. Por eso, a la hora de caracterizar un episodio, además de la cantidad de precipitación debe tenerse en cuenta la intensidad a la que precipita.

En el estudio de Camarasa-Belmonte (2016a) se pone de manifiesto cómo episodios considerados de alta magnitud por ambos conceptos (cantidad y/o intensidad) pueden generar escorrentía superficial, crecidas e incluso inundaciones. Según la autora, los totales acumulados de lluvia influyen sobre todo en los balances hídricos y en el volumen de la crecida, mientras que la intensidad afecta, sobre todo, a la velocidad de los procesos y a los tiempos del hidrograma.

2.2.1. Episodios voluminosos: influencia en aportaciones y balances hídricos

La cantidad de lluvia acumulada resulta un factor crucial para el volumen del hidrograma. Zoccatelli et al. (2019) analizan los procesos de generación de crecidas en 13 ramblas del Mediterráneo oriental y concluyen que la lluvia acumulada y la condición de humedad antecedente resultan determinantes en el aporte hídrico y el pico de crecida. En su trabajo sobre ramblas valencianas, Camarasa-Belmonte (2016a) corrobora el peso de la lluvia acumulada en la aportación total y en el caudal punta (Fig. 1), a través de su influencia sobre los balances hídricos (umbrales y déficits de escorrentía se muestran significativa y directamente dependientes de la lluvia acumulada).

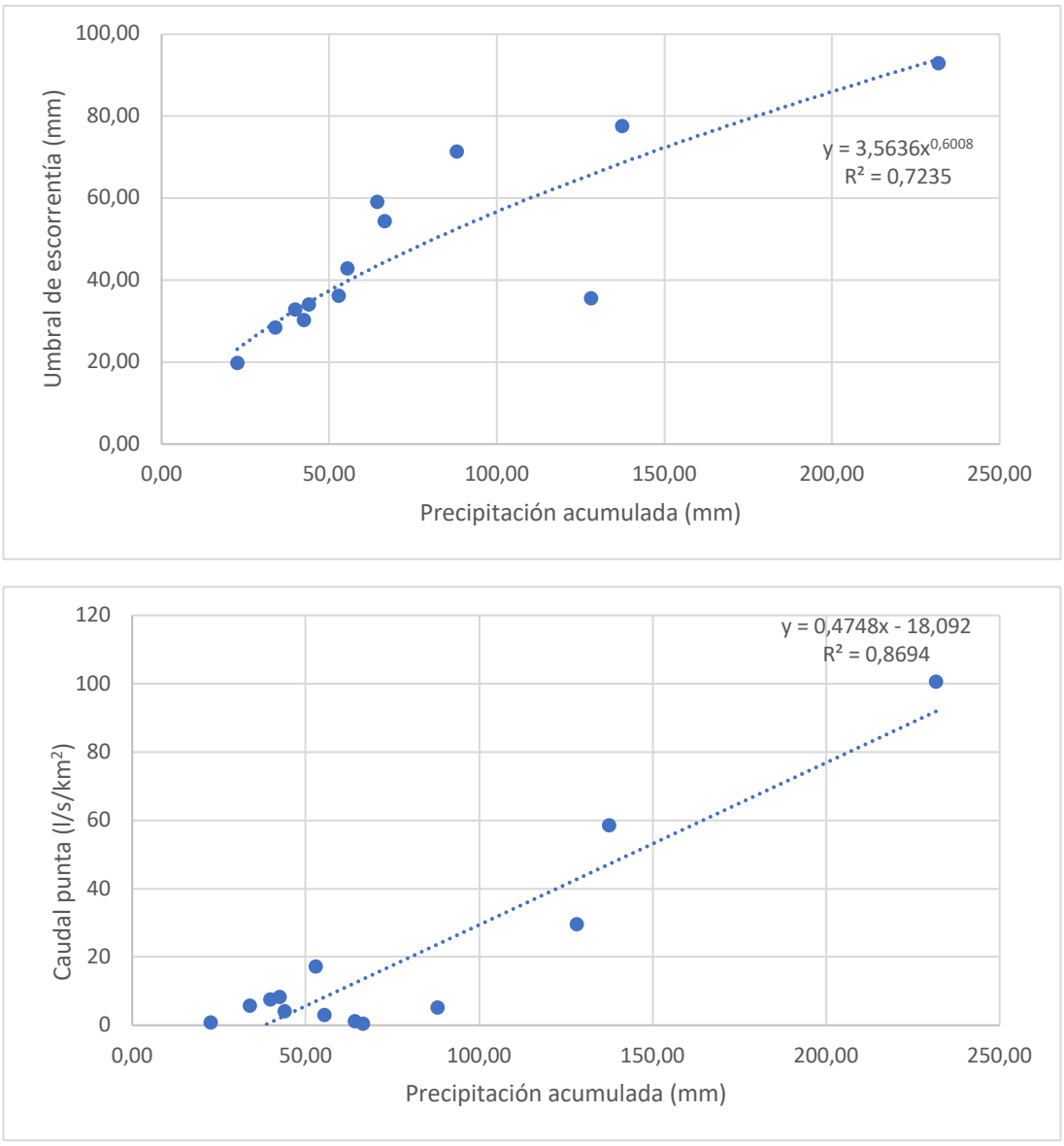


Figura 1. Relación entre la lluvia acumulada y los indicadores de umbral de escorrentía y caudal punta, en crecidas con condición de humedad antecedente seca (AMC I). Barranc del Carraixet. Fuente: Camarasa-Belmonte (2016a), modificado.

En términos medios, sólo un 6 % de lo que llueve en una rambla circula de manera superficial, a partir de umbrales medios de escorrentía en torno a los 62 mm. Sin embargo, con ocasión de episodios voluminosos se puede llegar a triplicar esta cifra, sobre todo en cuencas muy permeables. Un ejemplo de ello es el suceso de octubre del año 2000 en que todos los indicadores de balance hídrico (umbrales, déficits y coeficientes de escorrentía) incrementan mucho su valor, en función de los totales de precipitación (tabla 1). Especialmente significativo resulta el caso de la Rambla de Gallinera, que, durante este suceso, registró un umbral superior a 327 mm, cuando su valor medio es de 92 mm.

CUENCA	Precipitación acumulada (mm)		Umbral de escorrentía, P_0 (mm)		Déficit de escorrentía (mm)		Coeficiente de escorrentía (%)	
	Valor medio	Episodio de octubre del 2000	Valor medio	Episodio de octubre del 2000	Valor medio	Episodio de octubre del 2000	Valor medio	Episodio de octubre del 2000
Barranc de Carraixet	76,81	231,73	45,41	92,8	70,13	198,64	5,25	25
Rambla de Poyo	62,96	353,42	35,74	91,92	50,08	258,81	6,47	27
Rambla de Castellana	98,92	235,06	81,87	176,29	97,75	230,86	1,4	5
Rambla de Gallinera	142	514,79	92,8	327,05	135,26	505,7	7,74	56
Riu Vernissa	116,95	389,34	57,68	174,41	107,79	363,8	10,71	42
Valor medio	99,53	344,87	62,7	172,5	93,61	311,56	6,31	31

Tabla 1. Comparación entre los valores de lluvia acumulada e indicadores de balance hídrico medios y los del episodio de octubre del 2000, en cinco ramblas valencianas. Fuente: Camarasa-Belmonte (2016a).

En síntesis, los episodios que aportan grandes volúmenes de lluvia acumulada presentan una doble faceta de recurso y de riesgo. Por una parte, favorecen la transferencia de agua hacia los sistemas de almacenamiento de la cuenca (suelo, terrazas, cauce, subálveos, etc.) y suponen una fuente importante de conectividad hidrológica y aprovisionamiento hídrico para los ecosistemas mediterráneos. Por otra, también aportan grandes caudales y picos de crecida, que generan un riesgo elevado de inundación.

2.2.2. Episodios intensos: influencia en los tiempos de respuesta de la cuenca y generación de *flash-floods*

Junto con la lluvia acumulada, la intensidad del evento constituye el otro indicador crucial para definir la magnitud del episodio. Tarolli et al. (2012) sugiere que, en los episodios extremos, la intensidad de lluvia es más importante para la generación de escorrentía que la lluvia acumulada. Zoccatelli et al. (2019) corrobora esta afirmación en un estudio sobre diferentes cuencas semiáridas, resaltando el hecho de que cuanto más árido es el entorno más importancia adquiere la intensidad frente al total acumulado.

Camarasa-Belmonte (2016a) en su estudio sobre ramblas valencianas pone de manifiesto una significativa correlación entre los indicadores de intensidad de la tormenta y los tiempos de resupuesta de la cuenca, sobre todo el tiempo de retraso (lag-time).

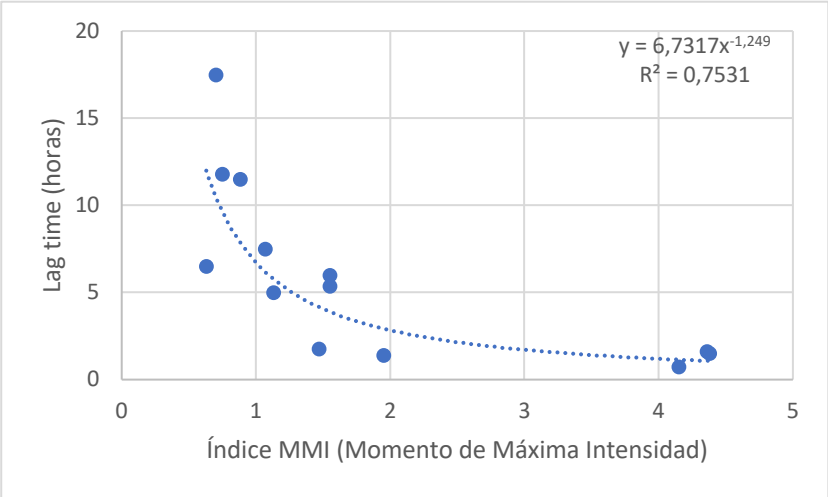


Figura 2. Relación entre la intensidad máxima y el tiempo de retraso de la cuenca (*lag time*) en crecidas con condición de humedad antecedente seca (AMC I), en el Barranc del Carraixet. Fuente: Camarasa-Belmonte (2016a), modificado.

Las grandes intensidades de lluvia pueden reducir significativamente la capacidad inicial de infiltración del suelo y los umbrales de escorrentía, de manera que se produce circulación superficial incluso en suelos que aún no se han saturado (Bull et al., 1999; Lange et al., 2003; Cammeraat, 2004). Se favorece así la rápida concentración del caudal punta y su traslación por la cuenca, dando lugar a situaciones de riesgo muy difíciles de prevenir. De hecho, la mayoría de las avenidas súbitas mediterráneas (*flash-flood*) tienen su origen en estos sucesos de gran intensidad (Camarasa and Tilford, 2002; Kokknen et al., 2004; Cudennec et al., 2007; Braken et al., 2008).

La respuesta de la cuenca no sólo está condicionada por la magnitud de la intensidad, sino por el momento, al principio o al final de la tormenta, en que se producen los valores máximos. La influencia de la estructura de la precipitación en la forma del hidrograma puede observarse en la figura 3 a partir de la comparación entre las curvas de acumulación de la lluvia y del caudal, para distintos episodios, en el Barranco del Carraixet (Camarasa-Belmonte, 2016b).

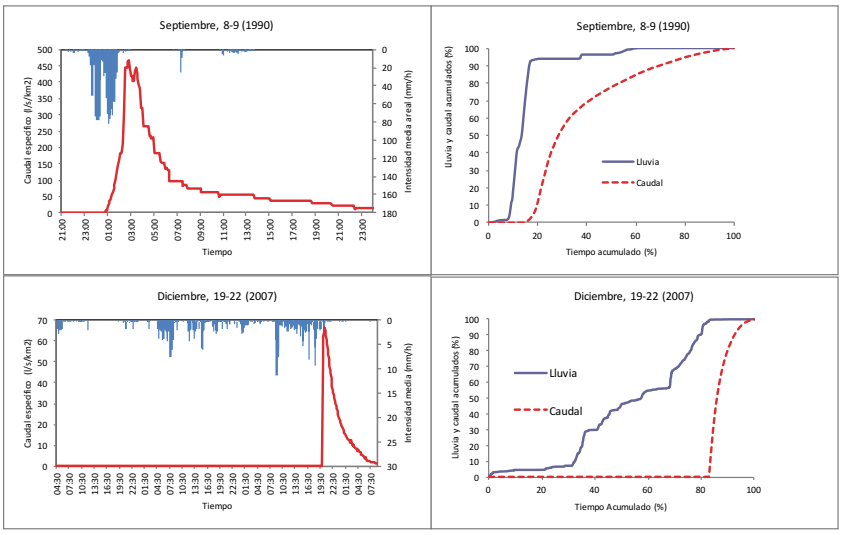


Figura 3. Episodios de septiembre de 1990 y diciembre de 2007 en el Barranc del Carraixet. Hidrogramas y curvas de lluvia y caudal acumulado. Fuente: Camarasa-Belmonte (2016b).

En el evento de septiembre de 1990 la intensidad máxima se produce al inicio, se supera la capacidad inicial de infiltración del suelo y la cuenca comienza a generar flujo superficial, incluso con los suelos no saturados. El hidrograma reproduce la forma del hietograma y se reduce mucho el tiempo de respuesta de la cuenca (*lag time*: 1,6 h). Por contra, en diciembre 2007 la máxima intensidad (11,5 mm/h) ocurre el final del suceso, con los suelos ya saturados. La cuenca responde más tarde *lag time*: 11,5 h) y la curva de acumulación del caudal no se parece a la de la lluvia. En el primer caso, la respuesta es tan rápida que la cuenca apenas tiene tiempo de intervenir, de manera que el caudal está controlado por intensidad de la precipitación, mientras que en el segundo caso la intervención de la cuenca es mucho mayor.

Con objeto de cuantificar este hecho, Camarasa-Belmonte (2016a) elabora el índice MMI (Momento de Máxima Intensidad) que muestra valores altos cuando las mayores intensidades se registran al inicio de la tormenta y valores bajos cuando se producen al final de la misma. La figura 4 refleja la relación inversa de este índice con el *lag time*.

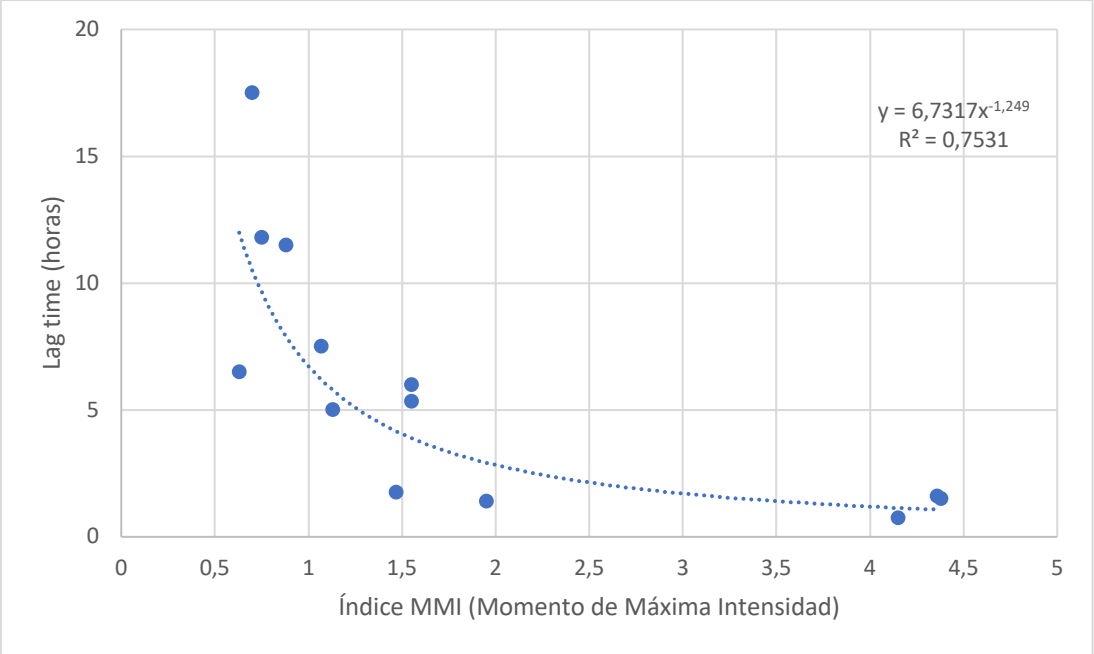


Figura 4. Relación entre el índice MMI (momento de máxima intensidad) y el tiempo de retraso de la cuenca (*lag time*) en crecidas con condición de humead antecedente seca (AMC I), en el Barranc del Carraixet. Fuente: Camarasa-Belmonte (2016a), modificado.

Cuanto más pronto se producen las intensidades importantes en una tormenta, más rápida es la respuesta de la cuenca (porque se minimiza su intervención en los procesos de conversión lluvia-caudal) y menos tiempo tiene la población para reaccionar frente al riesgo que supone. Por el contrario, cuando la intensidad se produce hacia el final del hietograma, la influencia de la cuenca es mayor, se incrementan las transferencias de agua hacia el acuífero, disminuyen el coeficiente de escorrentía y el pico máximo de caudal, y aumenta el tiempo de respuesta de la cuenca *(lag time*). Estos dos tipos de sucesos tienen un comportamiento estacional muy marcado: durante el verano y principios del otoño predomina el primer tipo (con la faceta de riesgo más desarrollada) y en invierno-primavera, el segundo (con predominancia de la faceta de recurso).

2.3. La generación de *flash-floods* o avenidas súbitas

A pesar de los bajos coeficientes de escorrentía e independientemente de cuándo se produzcan las mayores intensidades, los hidrogramas son muy apuntados y el tiempo al pico es muy corto. Un

ejemplo de ello lo encontramos en el suceso de marzo del 2004 (figura 4) en Carraixet, en que, en apenas 10 minutos, se alcanza el caudal punta (Camarasa-Belmonte, 2016a).

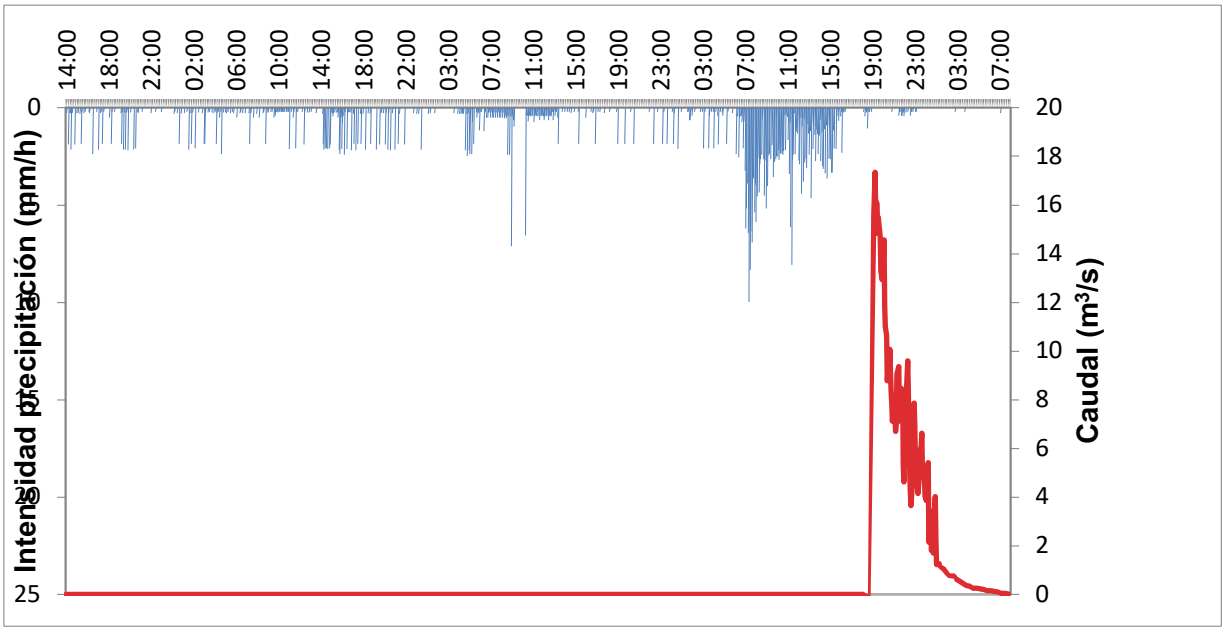


Figura 5. Episodios de marzo de 2004 en el Barranc del Carraixet. Hidrogramas. Fuente: Camarasa-Belmonte (2016a), modificado.

Este comportamiento parece que está relacionado con la formación de frentes de ola móviles que se deslizan sobre cauces secos. Incluso en los casos de crecidas de varios picos las diferentes puntas se forman de manera rápida, con cortos tiempos de ascenso y limbos de descenso más duraderos, que recogen las aportaciones tardías del agua almacenada en las formas sedimentarias de transición.

3. EVOLUCIÓN DE LAS CRECIDAS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO AMBIENTAL

Una vez expuesta la especificidad de las crecidas en ramblas, procede analizar cuál puede ser su devenir futuro en el contexto de cambio ambiental que estamos experimentando. Por una parte, nos encontramos ante un incuestionable escenario de cambio climático que desestabiliza los sistemas naturales. Por otra parte, la presión antrópica sobre estos sistemas, lejos de aliviar la situación contribuye a perturbar el equilibrio morfogenético de ramblas y barrancos.

Como es obvio esta sinergia se traduce en un incremento significativo del riesgo de inundación y de avenidas súbitas en unos sistemas que, debido a su circulación intermitente, no son percibidos como espacios de riesgo, hecho que aumenta su vulnerabilidad frente a las *flash-floods* (Torró et al., 2020).

3.1. Cambio climático: tendencia de los episodios de lluvia

El contexto de cambio climático en el que nos encontramos es innegable a día de hoy. Según el Quinto Informe de Evaluación del IPC (2014) se prevé un aumento de la temperatura media del planeta hasta 2100, de entre 0.3º y 1.7º en las mejores condiciones y, de 2.6 a 4.8º, en las peores. Los efectos en la precipitación y en los caudales no están claros, ya que la propia variabilidad de la lluvia añade mucha incertidumbre a las estimaciones, sobre todo en los entornos de transición climática, como las zonas mediterráneas.

En España, aunque no se pueden confirmar tendencias generales, los estudios apuntan hacia un descenso de la precipitación media en los meses de invierno, primavera y verano y un incremento de la precipitación intensa en Alicante y Murcia (Valdés-Abellan et al., 2017). Es la vertiente mediterránea la que, según todos los indicadores, va a sufrir los mayores impactos, por un aumento de las temperaturas y un marcado descenso de las precipitaciones de origen atlántico que afecta, sobre todo, a la zona de interior y al momento de transición entre primavera y verano (Miró et al., 2015; Marcos-García y Pulido-Velazquez, 2017).

Como ya se ha mencionado con anterioridad, trasladar el cambio pluviométrico al hidrológico, presenta muchas incertidumbres, sobre todo en el caso de ramblas, donde la no linealidad del proceso se incrementa exponencialmente. Con objeto de ajustar el análisis, Camarasa y López (2006) proponen una metodología para seleccionar episodios de lluvia con significación hidrológica, esto es, aquellos que por sus características (bien de cantidad acumulada, bien de intensidad) son susceptibles de generar escorrentía en la cuenca o, al menos, en una parte de la misma.

Aplicando este concepto Camarasa-Belmonte et al. (2020a) han llevado a cabo un estudio en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, donde se analiza la evolución temporal de episodios de lluvia desde 1989 hasta 2016. Se seleccionan y clasifican 698 episodios, caracterizados con indicadores de precipitación acumulada, intensidad y persistencia. Mediante un análisis cluster se obtienen tres tipos de episodios:

(1) Episodios de alta frecuencia y baja magnitud, que aportan un recurso pequeño pero continuado (descritos como *recurso limitado, exento de riesgo*).
(2) Episodios poco frecuentes de gran magnitud que suponen un recurso abundante pero también pueden suponer un riesgo (descritos como de *gran recurso a largo plazo no exento de riesgo*)
(3) Episodios de frecuencia intermedia y muy intensos, claramente identificables como de riesgo (descritos como *de riesgo con recurso asociado)*.

El análisis de la evolución temporal de episodios (figura 6) evidenció un incremento de la intensidad en detrimento de la cantidad de agua precipitada en todos los tipos de episodio. Interpretados en términos de recurso-riesgo, estos resultados implican el aumento del riesgo a costa del recurso. Esta tendencia presenta, además, una dicotomía espacial entre la zona de litoral y la de interior. Los cambios son más pronunciados en el interior, donde se está produciendo un mayor descenso de los recursos, hecho especialmente alarmante si consideramos que esta es la zona de generación de recursos hídricos y donde se ubican la mayor parte de los embalses. Por otra parte, el aumento de la intensidad en los episodios del litoral, implica un incremento del riesgo, ya que afectan a un área más poblada; no tienen la capacidad de gestión de los embalses y, al estar más urbanizados, dan lugar a grandes disrupciones de la vida cotidiana por las lluvias *in situ*.

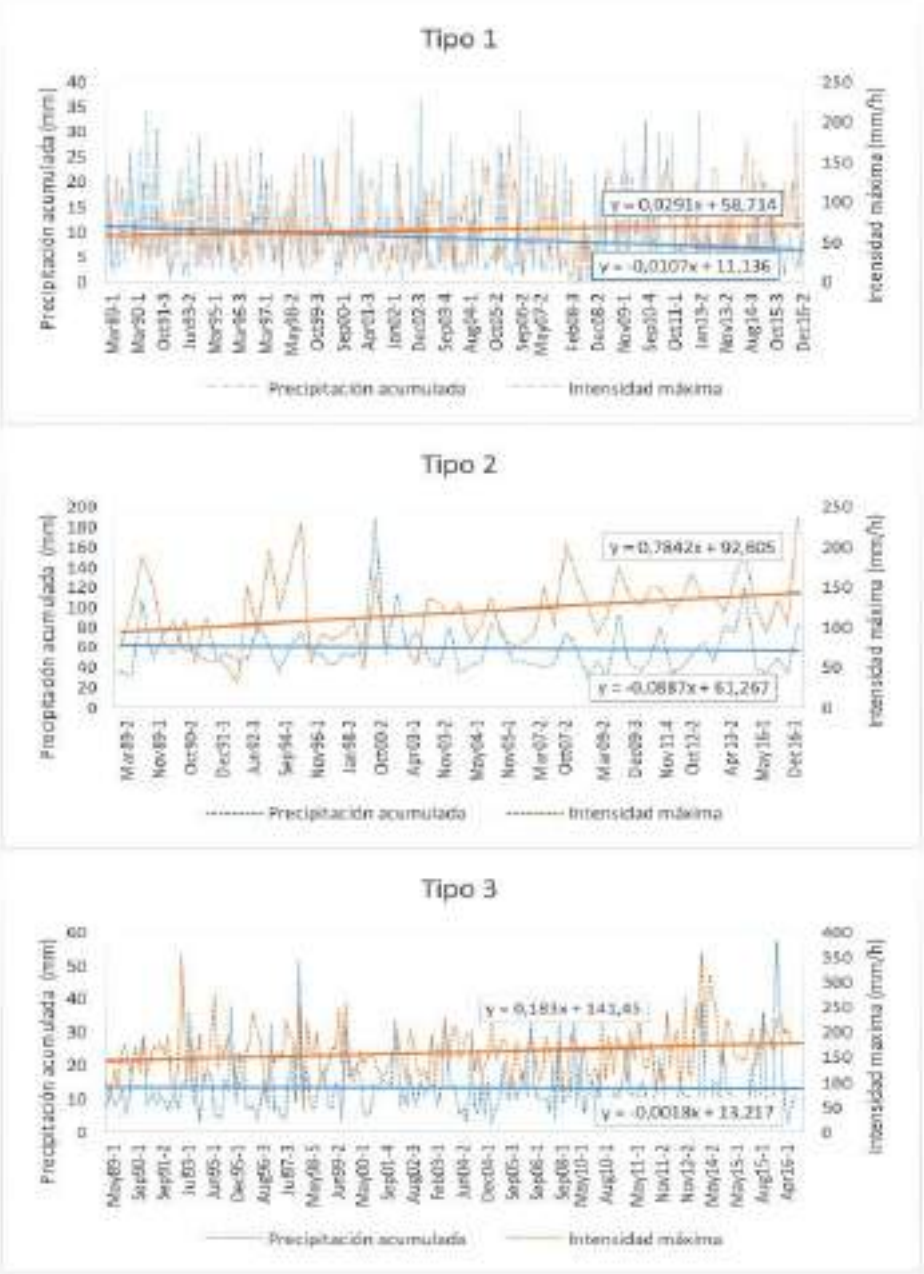


Figura 6. Tendencia en la evolución precipitación acumulada e intensidad máxima, en los tres tipos de episodio de lluvia de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 1989-2016. Fuente: Camarasa et al. (2020a).

En este estudio se apunta, además, un peligroso desplazamiento de los episodios intensos de verano hacia el otoño tardío, donde corren el riesgo de coincidir con los eventos de lluvia abundante, propios de la estación. Estas sinergias además de desequilibrar el sistema atentan contra las estrategias de adaptación al riesgo. El agua de los episodios intensos destinada a sostener los ecosistemas en verano no llega cuando debe y, sin embargo, puede coincidir con los grandes eventos tardo-otoñales. Así, crecidas que, en principio serían susceptibles de ser gestionadas con los instrumentos habituales de ordenación territorial (cartografía de riesgo, planificación, medidas estructurales, etc.), pueden superar los umbrales de tolerancia social al riesgo, mediante un incremento de su peligrosidad natural. Se desestabilizan, por tanto, unas medidas de adaptación que fueron concebidas el siglo pasado ante una problemática diferente, que no tenía en cuenta los cambios venideros de los sistemas naturales.

3.2. Cambio antrópico: degradación de los sistemas naturales y aceleración del ciclo hidrológico

Pese a la intermitencia de los recursos superficiales los ambientes de rambla han soportado durante más de 8.000 años un fuerte aprovechamiento agrícola. Históricamente se ha alcanzado un complejo equilibrio de explotación sostenible, basada en la conservación del suelo, el aprovechamiento del agua y el control de los riesgos por inundación y erosión. De hecho, según afirma Butzer (2005), el medio mediterráneo, a menudo descrito como altamente degradado, ha sido capaz de desarrollar una fuerte resiliencia ecológica y humana frente a la degradación. Sin embargo, los acelerados cambios de usos del suelo que se han producido recientemente están comprometiendo peligrosamente este equilibrio recurso/riesgo (Barredo y Engelen, 2010; Durán *et al*., 2014).

Los cambios afectan fundamentalmente a dos aspectos básicos: (1) por una parte a los procesos de conversión lluvia-caudal y generación de escorrentía y (2), por otra, al funcionamiento de la rambla, como sistema de drenaje encargado de vehicular el agua que se genera en las cabeceras hasta el mar. La acción antrópica provoca alteraciones en la producción de escorrentía, básicamente mediante cambios en usos del suelo y, en el drenaje, a través de intervenciones ingenieriles sobre el cauce y las zonas inundables.

3.2.1. Producción de escorrentía y pérdida de suelo

Camarasa-Belmonte et al. (2018) analizan los efectos que supusieron para la producción de escorrentía y la pérdida de suelo, los cambios de usos del suelo acaecidos entre 1956 y 2011, en el Barranc del Carraixet. Detectan que únicamente un 26 % de la cuenca mantiene el mismo uso, mientras que el 74 % presenta cambios de diferente naturaleza: retroceso del secano (en un 32 %) a costa del incremento de los cítricos (en un 15 %); disminución de la masa forestal (en un 23 %) a favor del matorral y aumento de la cobertura artificial (en un 13 %).

El sistema natural reacciona a estos cambios adaptando su dinámica erosiva y de producción de escorrentía superficial a los nuevos usos. Según este estudio, la producción de escorrentía está reaccionando mucho más rápida e intensamente que los de pérdida de suelo. Así, mientras los cambios de tendencia en la dinámica erosiva, más lenta, afectan al 33 % de la cuenca, la evolución en la producción de escorrentía es mucho más dinámica y afecta al 62 % de la misma. Tomando en consideración la superficie sujeta a cambios en ambos procesos (escorrentía y pérdida de suelo), habida cuenta que se están produciendo simultáneamente, sólo el 36 % de la cuenca es estable. El 64 % del área presenta alteraciones que afectan conjuntamente a los procesos de erosión y escorrentía, con sinergias negativas hacia la degradación (20 %) y otras positivas hacia la mejoría (6 %).

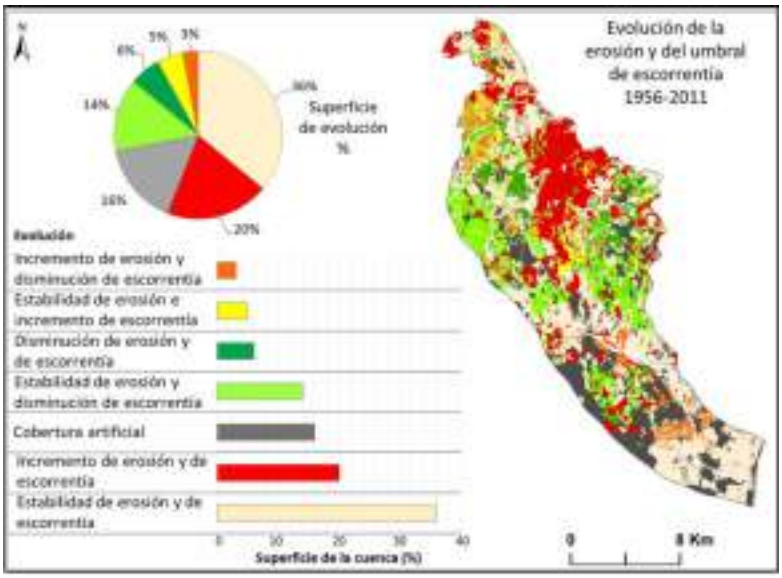


Figura 7. Evolución conjunta de los procesos de erosión y producción de escorrentía entre 1956 y 2011 en la cuenca del Carraixet. Fuente: Camarasa-Belmonte et al. (2018).

En síntesis, las modificaciones antrópicas de uso del suelo están alterando significativamente el equilibrio recurso-riesgo, incrementando el riesgo de erosión e inundación y disminuyendo el recurso de agua y suelo.

3.2.2. Disminución del almacenamiento en la cuenca y aceleración del drenaje

Como ya se ha visto, el incremento de intensidad de lluvia, constatado por la comunidad científica (Olcina, 2017), puede descompensar los procesos de conversión lluvia-caudal, generando escorrentía superficial en suelos no saturados. De este modo, el agua se concentra rápidamente en forma de escorrentía directa, formando *flash-floods* de picos importantes y peligrosos desde el punto de vista del riesgo. El ciclo hidrológico se acelera y se reducen los procesos de infiltración. A ello contribuye el sellado de suelo que supone la artificialización de una parte importante de la cuenca. El agua que debería almacenarse en suelos, terrazas y otras formas sedimentarias de la cuenca se drena, en apenas unas horas, sin que se hayan rellenado los diferentes reservorios naturales de la cuenca. Desde el punto de vista del recurso esto supone una pérdida importante, tanto para los ecosistemas naturales como para el aprovechamiento humano.

Ante este escenario, la mayor parte de medidas estructurales para el control de avenidas contribuyen a abreviar la permanencia del agua en el sistema. En este sentido son harto frecuentes las intervenciones destinadas a canalizar y "acortar" cauces, sobre todo en meandros, abanicos aluviales y llanuras de inundación, con obras que incrementan la velocidad de desagüe del canal, rectificando el trazado del lecho, ampliando su capacidad, reduciendo el rozamiento y aumentando la pendiente. Junto a la velocidad de evacuación se acelera la potencia erosiva de las aguas. Consecuencia de todo ello es que el cauce pierde la conectividad hidrológica con sus unidades geomorfológicas adyacentes (terrazas, llanuras, etc.) y drena el agua al mar rápidamente, sin tiempo ni espacio físico para realizar su actividad morfogenética y transferir agua a las unidades de almacenamiento.

Según Camarasa-Belmonte (2020) "los sucesos de alta energía deben tener tiempo y espacio para regularse. La intervención antrópica no debe contribuir a sacar cuanto antes los recursos de la cuenca sino a almacenarlos de manera natural, porque de lo contrario estamos contribuyendo a incrementar el riesgo, disminuir el recurso e inestabilizar el sistema". En este sentido, y en relación con el riesgo, cada vez son más comunes las iniciativas de *adaptación* frente a las de *lucha* contra las inundaciones, mediante planteamientos conservacionistas. Desde una perspectiva integrada se busca restablecer el equilibrio en las cabeceras (zonas productoras de escorrentía) manteniendo la máxima conectividad hidrológica de la cuenca. En materia de restauración fluvial se aboga por estrategias de corte geomorfológico (Ollero, 2015) que respeten, en la medida de lo posible, lo que se ha venido a denominar Territorio de Movilidad Fluvial (cauce, corredor ribereño y parte de la llanura de inundación en la que el río realiza sus reajustes de caudal y energía). De este modo se laminan las crecidas, se reduce el caudal-punta, se transfiere agua a los acuíferos y se retrasa y reduce la cantidad de recurso que se vierte al mar (Camarasa-Belmonte, 2020).

3.3. Cambio geomorfológico: desequilibrio morfogenético proceso-forma

La evolución geomorfológica natural de los sistemas fluviales semiáridos se produce como consecuencia de la acción morfogenética de episodios extremos (Brakenridge, 1988). Según Graff (1988) en los medios mediterráneos, los procesos controlan las formas en episodios de gran magnitud, mientras que las formas controlan los procesos en los de baja magnitud. En este sentido, según Bull (1997) las ramblas son sistemas morfogenéticos abocados al continuo desequilibrio, ya que durante los procesos de alta energía se crean grandes cauces adaptados a una evacuación importante de caudal, mientras que el resto del tiempo el cauce comienza a llenarse de sedimentos y vegetación para adecuarse a las condiciones de caudal escaso o nulo.

Wolman y Gerson (1978) utilizan el término *effectiviness* para denominar la capacidad de un episodio para modificar la forma del paisaje. Según estos autores, son los grandes eventos, de baja frecuencia, los que conforman el paisaje, mientras que, durante los episodios de alta frecuencia y baja energía, actúan los procesos restauradores, para devolver al paisaje la morfología orignial, durante lo que ellos denominan *recovery periods.* Este hecho tiene una relación directa con los entornos morfoclimáticos. Por ello, tras un suceso extraordinario, los cauces de ambientes húmedos tardarán entre unos meses y unos años en recuperar su forma; los de entornos semiáridos varias décadas y los de entornos áridos podrían incluso no recuperarla nunca.



Figura 8. Evolución de la frecuencia de episodios intensos con significación hidrológica en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Fuente: Camarasa-Belmonte (2020b).



Figura 9. Evolución de la eficiencia de los episodios de alta frecuencia y baja magnitud en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Fuente: Camarasa-Belmonte (2020b).

Llegados a este punto, cabría preguntarse cómo están afectando los cambios ambientales a la actividad morfogenética de las ramblas. Camarasa-Belmonte (2020b) apunta que la intensificación de los procesos que se desprende del cambio climático podría incrementar a largo plazo las fases morfogenéticas, porque aumentarían los episodios de gran eficiencia. Al mismo tiempo, al disminuir la energía de los procesos de menor magnitud, se reduciría la capacidad de restauración del sistema, incrementando los tiempos de recuperación de las formas originales. Las figuras 8 y 9 ponen de manifiesto cómo, en el territorio de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, se tiende hacia un incremento en la frecuencia de los episodios intensos, a la vez que disminuye la eficiencia de los

episodios restauradores. Todo ello conduce, sin duda, a una mayor desestabilización de los sistemas de rambla, con el consecuente incremento del riesgo en detrimento del recurso.

4. CONCLUSIONES

Ramblas y barrancos mediterráneos constituyen sistemas fluviales de circulación intermitente, que conllevan un riesgo de inundación más extendido de lo que en un principio pudiera parecer. La normativa de ordenación territorial es cada vez más consciente de este hecho, así como de las particularidades de su funcionamiento hidrogeomorfológico. Es por ello que la Directiva Marco aboga, cada vez con mayor contundencia, por el análisis de estas cuencas, a una escala detallada y con una metodología adaptada a sus características. El presente trabajo, basado en la recopilación de estudios sobre crecidas en ramblas, analiza los aspectos claves que definen la hidrología mediterránea y su previsible evolución en un contexto de cambio ambiental.

Dos características básicas explican los procesos hidrológicos y la formación de crecidas en ramblas: la intermitencia del flujo (por falta de conectividad del sistema) y la magnitud de los episodios (que posibilitan la formación de caudal y su continuidad hasta la desembocadura). Por la propia configuración hidrogeomorfológica de estas cuencas, los cauces están desconectados de los acuíferos y la circulación hídrica depende exclusivamente de la lluvia. Sin embargo, no todos los episodios producen escorrentía. Sólo con ocasión de grandes eventos se produce la conectividad suficiente entre todos los elementos de la cuenca como para generar caudal.

La magnitud de los episodios viene definida por el volumen de agua acumulada y por la intensidad de la lluvia. Los totales acumulados condicionan, sobre todo, el volumen del hidrograma y el caudal punta, a través de su influencia sobre los balances hídricos (relaciones directas significativas entre la cantidad de agua precipitada y los déficits y umbrales de escorrentía).

Por su parte las intensidades máximas determinan los tiempos de respuesta de la cuenca, patente en la significativa relación negativa que existe entre la intensidad máxima y el *lag time*. Además, no sólo son importantes los valores máximos de intensidad, sino el momento, al principio o al final de la tormenta, en que se producen dichos valores. Cuando las mayores intensidades se producen al inicio de la tormenta, se reducen los tiempos de respuesta de la cuenca y se incrementa la similitud entre las entradas de lluvia y el caudal. La cuenca apenas tiene tiempo de intervenir en los procesos de conversión lluvia-caudal, los umbrales de escorrentía bajan y suben los coeficientes de escorrentía superficial. Por el contrario, cuando las máximas intensidades se producen al final, la influencia de la cuenca es mayor, se incrementan las transferencias de agua hacia el acuífero, disminuyen el coeficiente de escorrentía y el pico de caudal y aumenta el *lag time*. En consecuencia, sucesos con altas intensidades al inicio de la tormenta entrañan un riesgo importante, mientras que si la intensidad disminuye y se produce al final de la tormenta constituyen un recurso.

El contexto de cambio ambiental en el que nos encontramos anuncia una evolución de estos sistemas de rambla hacia un claro incremento del riesgo en detrimento del recurso. Por una parte, la evolución de los episodios mediterráneos muestra una intensificación de los mismos (tienden a aumentar en intensidad y disminuir en cantidad acumulada). Este comportamiento, más acusado en el interior que en la costa, dificulta el almacenamiento de recursos en las cabeceras fluviales (ubicadas en el interior), al tiempo que incrementa el riesgo en las cuencas bajas, más pobladas, de la costa. Desde el punto de vista antrópico, los cambios de usos del suelo y las obras estructurales, lejos de paliar el problema, aceleran el drenaje del agua al mar, dificultando el almacenamiento del recurso en los reservorios naturales de la cuenca (suelos, terrazas, acuíferos). Todo ello contribuye, a largo plazo, a incrementar el desequilibrio morfogenético entre procesos y formas, con el consiguiente incremento del riesgo.
Revertir la tendencia al incremento del riesgo en ramblas implica estrategias de adaptación basadas

en la flexibilidad. Debemos de ser conscientes que gran parte de las medidas de control, mitigación y gestión de inundaciones del s. XX, a día de hoy, han quedado obsoletas por resultar muy puntuales y demasiado rígidas. No podemos olvidar que estamos en un contexto de cambio y los sistemas naturales necesitan tiempo y espacio para adaptarse. En este sentido, deben primar los planteamientos conservacionistas con el medio ambiente, porque reducir el riesgo pasa por desarrollar sistemas de resiliencia compatibles con la dinámica natural. Para ello resulta fundamental aumentar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeomorfológico de ramblas y barrancos, con objeto de ser capaces de arbitrar soluciones del siglo XXI para problemas de este siglo y venideros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto CGL2017-83546-C3-1-R (Subproyecto 1) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y fondos FEDER.

REFERENCIAS

- Barredo, J. I. y Engelen, G. (2010). Land Use scenario modeling for flood risk mitigation. *Sustainability,* 2, 1327-1344.
- Bracken, L. J. y Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic system. *Hydrological Processes*, 21, 1749-1763.
- Bracken, L. J., Cox, N. J. y Shannon, J. (2008). The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. *Hydrological Processes*, 22, 683-696.
- Brakenridge, G. R. (1988). River flood regimen and floodplain stratigrafy. *Floods Geomorphology*, 139-155.
- Bull, L. J. y Kirkby, M. J. (2002). Dryland river characteristics and concepts. En: L. J. Bull y M. J. Kirkby (Eds.), *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorpohology of Semi-Arid Channels*. John Wiley and Sons: Chichester, Inglaterra.
- Bull, L. J., Kirkby, M. J., Shannon, J. and Hooke, J. M. (1999). The impact of rainstorms on floods in ephemeral channel in southeast Spain, *Catena*, 38, 191-209.
- Bull, W. B. (1997). Discontinuous ephemeral streams. *Geomorphology*, 19, 227-276.
- Butzer, K. W. (2005). Environmental history in the Mediterranean world: cross-disciplinary investigation of cause-and-effect for degradation and soil erosion. *Journal of Archaeological Science*, 32, 1773-1800. https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.06.001
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016a). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology, 541*(Part A), 99-115. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.019
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016b). La especificidad de la hidrología en ramblas mediterráneas. En: J. F. Mateu (Ed.), *El territorio valenciano. Transformaciones ambientales y antrópicas*, 1-4.
- Camarasa-Belmonte, A. M., Caballero López, Mª P. e Iranzo García, E. (2018). Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensanciones enuna rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956–2011). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 127-153. http://dx.doi.org/10.21138/2714.
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2020b). Cambio global y sostenibilidad. En: J. Farinós (Coord.), *Desafíos y oportunidades de un mundo en transición. Una interpretación desde la Geografía*, 29-40. PUV.
- Camarasa-Belmonte, A. M. y López-García, M.J. (2006). Criterios de selección y caracterización de episodios de lluvia. Aplicación a la Confederación Hidrográfica del Júcar (1989-2003). En: *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*, Serie A, 5, 323-336. Publicaciones AEC.
- Camarasa-Belmonte, A. M. y Soriano, J. (2014). Empirical study of extreme rainfall intensity in a semi-arid environment at different time scale. *Journal of Arid Environments*, 100-101, 63-71.
- Camarasa-Belmonte, A. M., Rubio Vila, M. y Salas Rey, J. (2020a). Evolución de episodios

pluviométricos en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (1989-2016): del recurso al riesgo. *Investigaciones Geográficas*, 73, 11-29. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.CBRVSR

- Camarasa, A. M. and Segura, F. (2001). Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *Catena*, 45, 229-249.
- Camarasa, A. M. y Tilford, K. (2002). Rainfall-runoff modelling of ephemeral streams in the Valencia region (Eastern Spain). *Hydrological Processes*, 16 (17), 3329-3344.
- Cammeraat, E. (2004). Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 317-332.
- Conesa, C. (2005). Les 'ramblas' du Sud-est Espagnol: Systèmes hydromorphologiques en milieu méditerranéen sec. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 205-224.
- Costa, A. C., Foerster, S., Araújo, J. C. y Bronstert, A. (2012). Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in north-eastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data. *Hydrological Processes*, https://doi.org/10.1002/hyp.9243
- Cudennec, C., Leduc, C. y Koutsoyiannis, D. (2007). Dryland hydrology in Mediterranean regions –a review. *Hydrological Sciences Journal*, *52*(6), 1077-1087.
- Durán, Z. V. H., Rodríguez, P. C. R., Cuadros, T. S. y Francia, M. J. R. (2014). Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. *Ecosistemas*, 23(1), 66-72.
- Gómez, R., Hurtado, I., Suárez, M. L. y Vidal-Abarca, M. R. (2005). Ramblas in south-east Spain: threatened and valuable ecosystems. *Aquat. Conserv*. 15, 387-402.
- Graff, W. L. (1988). *Fluvial processes in dryland river*. Springer, Berlin.
- Klemes, V. (1983). Conceptualization and Scale in Hydrology. *Journal of Hydrology,* 65, 1-3, 1-23. https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90208-1
- Kokkonen, T., Koivusalo, H., Karvonen, T., Croke, B. y Jakeman, A. (2004). Exploring streamflow response to effective rainfall across event magnitude scale. *Hydrological Processes*, 18, 1467-1486.
- Lange, J., Greenbaum, N., Husary, S., Ghanem, M., Leibundgut, C. y Shick, A. P. (2003). Runoff generation from sucessive simulated rainfalls on a rocky, semi-arid, Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 17, 279-296.
- López-Bermúdez, F., Conesa-García, C. y Alonso-Sarriá, F. (2002). Floods: magnitude and frequency in ephemeral streams of the Spanish Mediterranean Region. En: L. J. Bull y M. J. Kirkby (Eds.), *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorpohology of Semi-Arid Channels,* 329-350. John Wiley and Sons: Chichester, Inglaterra.
- Marcos-García, P. y Pulido-Velázquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para la demarcación?. *Ingeniería del Agua*, *21*(1), 35-52. https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361
- Olcina, J. (2017). Incremento de episodios de inundación por lluvias de intensidad horaria en el sector central del litoral mediterráneo español: análisis de tendencias en Alicante. *SÉMATA, Ciencias Socias e Humanidades*, 29, 143-163. http://hdl.handle.net/10045/73413
- Ollero, A. (2015). *Buenas Practicas en Restauración Fluvial (10 ejemplos*). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21171.84002
- Petrakis, M., Giannakopoulos, C. y Lemesios, G. (2012) Report on observed changes and responses to climate change worldwide and in Cyprus. En: CYPADAPT - development of a national strategy for adaptation to climate change adverse impacts in Cyprus. LIFE10 ENV/CY/000723. DELIVERABLE 1.1. National Observatory of Athens, Athens, Greece http://cypadapt.uest.gr/wp-content/uploads/DELIVERABLE1.1.pdf
- Segura, F. (2004). Ramblas y Barrancos: los ríos de piedras. *Métode*, 38, 109-117.
- Skoulikidis, N. T., Sabater, S., Datry, T., Morais, M. M., Buffagni, A., Dörflinger, G., Zoogaris, S., Sánchez-Montoya, M. M., Bonada, N., Kalogianni, E., Rosado, J., Vardakas, L., De Girolamo,

A. M. y Tockner, K. (2017). Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: status, pressures, and challenges for research and management. *Science of the Total Environment*, 577, 1-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.147

- Snelder, T. H., Datry, T., Lamouroux, N., Larned, S. T., Sauquet, E., Pella, H. y Catalogne, C. (2013). Regionalization of patterns of flow intermittence from gauging station records. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 17, 2685-2699.
- Tarolli, P., Borga, M., Morin, E. y Delrieu, G. (2012). Analysis of flash flood regimes in the North-Western and South-Eastern Mediterranean regions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1255-1265. https://doi.org/10.5194/nhess-12-1255-2012.
- Torró, M., Camarasa-Belmonte, A. M. y Pitarch, M. D. (2019). Percepción del riesgo de inundación en el municipio de Ontinyent (Comunitat Valenciana). *Cuadernos de Geografía,* 103, 117-140.
- Valdés-Abellan, J., Pardo, M. A. y Tenza-Abril, A. J. (2017). Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology* https://doi.org/10.1002/joc.4984
- Wolman, M. G. y Gerson, R. (1978). Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes*, 3, 189-208.
- Yair, A. y Kossovosky, A. (2002). Climate and surface properties: hydrological response of small arid and semi-arid watersheds. *Geomorphology*, 42, 43-57.
- Yair, A. y Raz-Yassif, N. (2004). Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length. *Geomorphology*, 61, 155-169.
- Zoccatelli, D., Borga1, M., Viglione, A., Chirico, G.B. y Blöschl, G. (2011). Spatial moments of catchment rainfall: rainfall spatial organisation, basin morphology, and flood response. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 15, 3767-3783. www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3767/2011/doi:10.5194/hess-15-3767-2011
- Zoccatelli, D., Marra, F., Armon, M., Rinat, Y., Smith, J. A. y Morin, E. (2019). Contrasting rainfall-runoff characteristics of floods in desert and Mediterranean basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 2665-2678. https://doi.org/10.5194/hess-23-2665-2019

ESTADO DE IMPLANTACIÓN DE LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN (P.G.R.I.) EN ESPAÑA

Francisco Javier Sánchez Martínez
Subdirector General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
fsmartinez@miteco.es

Mónica Aparicio Martín
Jefa de área en la Subdirección General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
maparicio@miteco.es

Juan Francisco Arrazola Herreros
Jefe de servicio en la Subdirección General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
jfarrazola@miteco.es

RESUMEN

La herramienta clave de la Directiva 2007/60, de evaluación y gestión de los riesgos de inundación (Directiva de Inundaciones) es la elaboración, aprobación e implantación de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), regulados por los capítulos 4 y 5 del Real Decreto 903/2010 (artículos 11 al 17) que transpone la Directiva al ordenamiento jurídico español. Estos PGRI fueron aprobados en la mayor parte de las demarcaciones hidrográficas españolas en el año 2016 y su período de vigencia se extiende hasta 2021, al término del cual se revisarán y actualizarán, aprobándose los PGRI de 2º ciclo (2022-2027). En ellos se recoge la caracterización de la peligrosidad y riesgo de la demarcación, los objetivos de gestión del riesgo y las medidas que cada administración u organismo responsable debe aplicar en el ámbito de sus competencias para alcanzar los objetivos previstos. En este sentido, las distintas administraciones competentes están realizando un gran esfuerzo para la ejecución del programa de medidas, como se puede comprobar en esta ponencia, en la que se describe su grado de implantación y se muestran algunas de las actuaciones más destacadas en todos los ámbitos de la gestión del riesgo.

1. INTRODUCCIÓN: LA DIRECTIVA DE INUNDACIONES Y LOS P.G.R.I.

La Directiva 2007/60, de evaluación y gestión de los riesgos de inundación, fue aprobada en 2007 y entró en vigor en el año 2009, obligando a los Estados miembros de la Unión Europea a realizar una adecuada planificación y gestión del riesgo de inundación en coordinación con la planificación hidrológica de la Directiva Marco del Agua. En España fue traspuesta por el Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión del riesgo de inundación.

Esta Directiva establece la realización de los siguientes trabajos, que en España se realizan en el ámbito de cada demarcación hidrográfica como unidad de gestión, y que se revisan cíclicamente cada 6 años:

1. Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) que conlleva la identificación de los tramos de ríos y de costa con mayor riesgo de inundación, las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI). Este trabajo se realizó en el año 2011 y durante los años 2018 y 2019 se ha procedido a su revisión y actualización. Actualmente se han identificado 1446 ARPSI que suponen más de 10.460 km de tramos de ríos y de costa.
2. Elaboración de los Mapas de peligrosidad por inundación y de riesgo de inundación en las ARPSI seleccionadas en la EPRI. Este trabajo se realizó en el año 2013 y entre 2019 y 2020 se ha procedido a su revisión y actualización. Ya se han aprobado en la mayoría de las demarcaciones y están disponibles en el visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) (sig.miteco.gob.es/snczi) que es el portal oficial para la implantación de la Directiva.
3. Elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI). Los primeros planes fueron aprobados en 2016 y se va a comenzar su revisión a partir de septiembre de 2020 y durante 2021, proceso que concluirá con su aprobación en diciembre de 2021.

Los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), tienen como objetivo último lograr una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y la sociedad para reducir las consecuencias negativas de las inundaciones, basándose en los programas de medidas que cada una de las administraciones debe aplicar en el ámbito de sus competencias.

Los objetivos generales de gestión del riesgo que contemplan los PGRI aprobados se muestran a continuación.

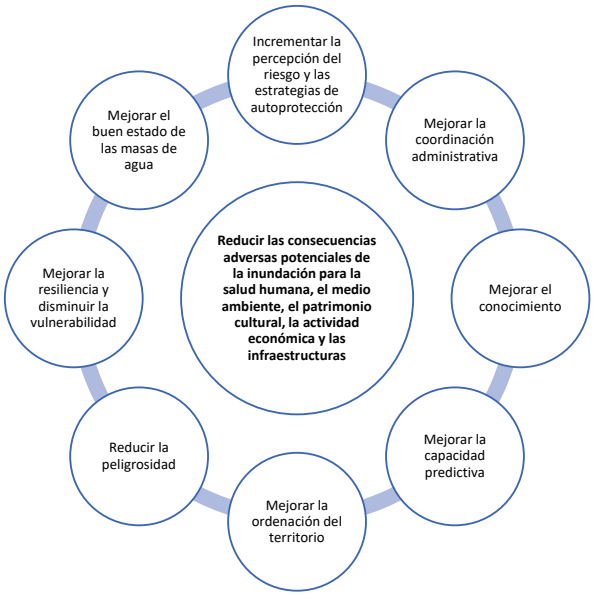


Figura 12. Objetivos generales de los PGRI.

Los PGRI vigentes, que se redactaron en estrecha colaboración con las autoridades de Protección Civil Estatales y Autonómicas, suman más de 1.000 medidas (unas 80 medidas de media por PGRI en cada demarcación) con una inversión superior a los 800 millones de euros para el periodo 2016-2021 para todas las demarcaciones.

Tal y como establece la Directiva, los programas de medidas de los PGRI contienen cuatro grandes grupos de medidas, que abarcan todas las fases de la gestión del riesgo:

- En materia de **prevención,** se trata de medidas diseñadas para anticipar el problema. Por ejemplo, promoviendo políticas de ordenación del territorio y urbanismo, o actuaciones en conservación y mantenimiento de los ríos y del litoral.

- En el ámbito de la **protección**, estos planes recogen las actuaciones materiales que ayudan a disminuir la peligrosidad de las avenidas. Se trata de proyectos de restauración fluvial, de actuaciones coordinadas con la gestión de los embalses en situación de avenidas, o de obras en carreteras y líneas de ferrocarril que mejoren el desagüe de las avenidas.

- Los planes también contemplan medidas de **preparación** ante un episodio de inundación, mediante la mejora de los sistemas de aviso y alerta, tanto meteorológicas (AEMET) como hidrológicas (organismos de cuenca) y el refuerzo de los protocolos de comunicación entre Administraciones y sectores afectados.

- Por último, se establecen medidas de **recuperación**, a desarrollar después de un episodio de inundación, con el fin de restablecer la normalidad lo antes posible. Son medidas como las relativas a la aplicación de los seguros o a la ejecución de obras de emergencia para restaurar elementos afectados.



Figura 13. Tipologías de las medidas recogidas en el Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión del riesgo de inundación.

Las medidas que recogen los PGRI son aplicadas por distintas administraciones y el ámbito en el que se aplican, de acuerdo con sus competencias, es:

- Nacional/Autonómico.
- Demarcación.
- ARPSI.

Cada Administración u Organismo es responsable de la ejecución de las medidas que ha decidido incluir en el PGRI, si bien puede contar en su desempeño con la colaboración de otras administraciones. Las administraciones competentes son las siguientes:

- Organismos de cuenca: Confederaciones Hidrográficas y administraciones autonómicas competentes en la gestión de las demarcaciones hidrográficas intracomunitarias.
- Administración General del Estado: Dirección General del Agua, Dirección General de la Costa y el Mar, Oficina Española de Cambio Climático y Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD),

Dirección General de Protección Civil y Emergencias del Ministerio del Interior, Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) entidad pública empresarial dependiente del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA), organismo autónomo dependiente del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, distintas departamentos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

- Administración autonómica: autoridades autonómicas de Protección Civil, departamentos de agricultura, medio ambiente, agua, agencias meteorológicas, ordenación del territorio, urbanismo, economía, presidencia de Gobierno, etc.
- Administración local: ayuntamientos, otras entidades locales, autoridades de Protección Civil a nivel local.
- Institutos y Centros de investigación, universidades.
- Otros: titulares de presas de concesionarios, titulares de infraestructuras, …

La distribución de cada una de las tipologías de medidas por ámbito para la suma de los planes aprobados en las cuencas intercomunitarias se muestra en la siguiente tabla:

Ámbitos de aplicación	**Tipología de medidas**					
	Prevención	**Protección**	**Preparación**	**Recuperación y revisión**	**Total**	**Porcentaje**
Nacional / Autonómico	24	15	41	26	**106**	**43,98%**
Demarcación Hidrográfica	23	16	10	0	**49**	**20,33%**
Áreas de Riesgo Potencial Significativo	5	55	2	24	**86**	**35,68%**
Total	**52**	**86**	**53**	**50**	**241**	**100 %**
Porcentaje	**21,58%**	**35,68%**	**21,99%**	**20,75%**	**100 %**	

Tabla 1. Distribución de cada una de las tipologías de las medidas recogidas en el Real Decreto 903/2010.

2. PRINCIPALES ACTUACIONES REALIZADAS PARA LA IMPLANTACIÓN DE LOS P.G.R.I.

En este apartado se resumen algunas de las actuaciones realizadas desde 2016 hasta la actualidad para la implantación de los PGRI en las demarcaciones intercomunitarias. Primeramente, en el apartado 2.1 se incluye una tabla resumen con algunos de los trabajos más destacados realizados por distintas administraciones según el tipo de medida que recogen los PGRI y según el ámbito de gestión del riesgo (prevención, preparación, protección y recuperación). En el apartado 2.2 se detalla en mayor profundidad algunas actuaciones destacadas, clasificándolas también según el ámbito de gestión del riesgo.

2.1. Resumen de las principales actuaciones por tipo de medida

2.1.1. Actuaciones en prevención

Medida	Actuaciones realizadas o en ejecución
Ordenación del territorio y urbanismo: limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables, criterios para considerar el territorio como no urbanizable y criterios constructivos para las edificaciones situadas en zona inundable. Medidas para adaptar el planeamiento urbanístico	- Modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) estableciendo limitaciones a los usos y guía técnica para su aplicación - Informes urbanísticos emitidos por los organismos cuenca de acuerdo con el art 25.4 TRLA - Publicación Guías técnicas sobre criterios constructivos y adaptación al riesgo de inundación: agricultura y ganadería; redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras; edificaciones; sistemas urbanos de drenaje sostenible - Aplicación de estas guías a diferentes casos piloto de edificaciones, industrias y otras instalaciones urbanas, explotaciones agrícolas y ganaderas. Previsión de realizar otros 50 anteproyectos a partir de 2020. - Adaptación del planeamiento municipal al RDPH. - Mejora de la información disponible sobre inundabilidad en los visores cartográficos de las diferentes administraciones.
Elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación	-Creación de contenidos web y de un grupo de interés en I+D+i en inundaciones. Celebración de una jornada anual sobre I+D+i en inundaciones. - Estudio de los efectos del cambio climático en inundaciones e incorporación a la EPRI. - Elaboración y actualización de cartografía: aprobación de la mayoría de las revisiones y nuevos tramos de 2º ciclo de los mapas de peligrosidad y riesgo en el primer semestre de 2020. - Estudio de inundaciones pluviales, de intensidades y precipitaciones máximas. Mejora CauMax. - Mejora del programa de modelización hidráulica bidimensional Iber.
Programa de mantenimiento y conservación de cauces	- Desarrollo ordinario programa de conservación y mantenimiento de cauces. - Publicación de un Manual de buenas prácticas en conservación de cauces.
Programa de mantenimiento y conservación del litoral	- Desarrollo ordinario mantenimiento y conservación del litoral.

Tabla 2. Síntesis de actuaciones en prevención.

2.1.2. Actuaciones en protección

Medida	Actuaciones realizadas o en ejecución
Medidas en la cuenca: Restauración hidrológico-forestal y ordenaciones agrohidrológicas	- Estudio de varias propuestas a raíz de episodios recientes. - Proyectos de repoblación en cuencas vertientes en La Rioja y en la cuenca del Segura.
Medidas en cauce y llanura de inundación: Restauración fluvial, incluyendo medidas de retención natural del agua y reforestación de riberas	- Ejecución de proyectos de restauración fluvial - Redacción de 30 proyectos de restauración fluvial - Inventario de obras de defensa frente a inundaciones: recopilación de información y evaluación de su estado.
Medidas de restauración de la franja costera y de la ribera del mar	- Ejecución de algunos proyectos de restauración costera
Normas de gestión de la explotación de embalses durante las avenidas	- Se continúa avanzando en la aprobación de las normas de explotación de presas pendientes tanto de titularidad estatal como de concesionario.
Medidas estructurales para regular los caudales, tales como la construcción y/o modificación de presas exclusivamente para defensa de avenidas	- Elaboración de estudios de coste-beneficio, viabilidad y priorización de este tipo de obras estructurales
Medidas de mejora del drenaje de infraestructuras lineales: carreteras, ferrocarriles	- Aprobación de la actualización de la Norma 5.2 - IC de drenaje superficial. - Análisis de tramos con insuficiente drenaje transversal.
Medidas estructurales (encauzamientos, motas, diques, etc..) que implican intervenciones físicas en los cauces, aguas costeras y áreas propensas a inundaciones	- Elaboración de estudios de coste-beneficio, viabilidad y priorización de este tipo de obras estructurales.
Medidas que implican intervenciones físicas para reducir las inundaciones por aguas superficiales, por lo general, aunque no exclusivamente, en un entorno urbano, como la mejora de la capacidad de drenaje artificial o sistemas de drenaje sostenible (SuDS)	- Ejecución de proyectos de SuDS en algunos municipios. - Modificación del RDPH que promueve SuDS en el artículo 126 ter.

Tabla 3. Síntesis de actuaciones en protección.

2.1.3. Actuaciones en preparación

Medida	Actuaciones realizadas o en ejecución
Establecimiento y mejora de los sistemas de alerta meteorológica	AEMET está ejecutando medidas como la ampliación de los fenómenos objeto de aviso, la coordinación con otros organismos, la mejora de la divulgación y difusión de los fenómenos meteorológicos adversos a través de los canales de comunicación establecidos.
Medidas para establecer o mejorar los sistemas medida y alerta hidrológica	- Actividad ordinaria de mantenimiento de redes de medida y control. - Mejora de la red y proceso de modernización, optimización e integración de las redes existentes en un Sistema Automático de Información (SAI)
Medidas para establecer o mejorar la planificación institucional de respuesta a emergencias de inundaciones a través de la coordinación con Planes de Protección Civil	- Actualización progresiva de los Planes especiales autonómicos de Protección Civil frente al riesgo de inundación al contenido de los PGRI - Promoción y elaboración de planes locales en casi todas las comunidades autónomas.
Medidas para establecer o mejorar los protocolos de actuación y comunicación de la información	- Diseño piloto de protocolo de comunicación y de alerta hidrológica a nivel estatal, pendiente de empezar a implantarse en los organismos de cuenca. - Algunas autoridades autonómicas de protección civil están elaborando sus propios protocolos.
Medidas para establecer o mejorar la conciencia pública en la preparación para las inundaciones, incrementar la percepción del riesgo de inundación y de las estrategias de autoprotección en la población, los agentes sociales y económicos	Campañas de divulgación desde diversas administraciones: MITERD, organismos de cuenca, autoridades de protección civil, ayuntamientos, CCS, AEMET, etc. a través de jornadas divulgativas, campañas formativas, mejora de la información en páginas web, elaboración de publicaciones y folletos, elaboración de guías, vídeos, etc.

Tabla 4. Síntesis de actuaciones en preparación.

2.1.4. Actuaciones en recuperación y evaluación

Medida	Actuaciones realizadas o en ejecución
Obras de emergencia para reparación de infraestructuras afectadas, incluyendo infraestructuras sanitarias y ambientales básicas.	- Ejecución de obras de emergencia tras un evento de inundación.
Planes de Protección Civil: acciones de apoyo a la salud, asistencia financiera, incluida asistencia legal, así como reubicación temporal de la población afectada	Actividades de Protección Civil en la fase de recuperación tras un episodio de inundación
Promoción de seguros frente a inundación sobre personas y bienes, incluyendo los seguros agrarios	- CCS: reducción tarifas, cobertura se amplía a automóviles, celebración de jornadas, edición guía edificios, mejora tratamiento datos. - ENESA: divulgación a través de web y jornadas divulgativas, perfeccionamiento coberturas y mantenimiento subvención.
Medidas de evaluación, análisis y diagnóstico de las lecciones aprendidas de la gestión de los eventos de inundación	- Elaboración metodología común para elaboración informes de lecciones aprendidas. - Algunas demarcaciones o autoridades de protección civil han elaborado informes propios de evaluación de eventos o lecciones aprendidas.

Tabla 5. Síntesis de actuaciones en recuperación y evaluación.

2.2. Descripción de actuaciones destacadas realizadas o en ejecución

A continuación, se detallan algunas actuaciones que se consideran de mayor interés, y que están mencionadas en las tablas del apartado anterior. Se han clasificado también según el ámbito de gestión del riesgo (prevención, preparación, protección y recuperación).

2.2.1. Medidas prevención

Con el objetivo de mejorar la ordenación del territorio y la gestión de la exposición en las zonas inundables, destaca a nivel nacional la aprobación en diciembre de 2016 del Real Decreto 638/2016, de modificación del Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH). Esta modificación vino a establecer una normativa homogénea a nivel nacional que está permitiendo desarrollar de forma segura las actividades proyectadas sobre zonas inundables. Establece que en la superficie en donde en una inundación se producirán graves daños, denominada zona de flujo preferente, no deben establecerse actividades vulnerables frente a las avenidas, especificando aquellas que así se consideran, y que, en el resto de zona inundable, donde los daños en una inundación serán menores, las edificaciones que se construyan deben estar diseñadas para resistir la inundación, estableciéndose unos requisitos básicos para el diseño de estas edificaciones. Complementariamente, se ha elaborado una guía técnica de apoyo para la aplicación

de esta modificación reglamentaria, disponible en la web del Ministerio. Una de las novedades más destacadas de esta norma es la obligatoriedad de que la condición de inundable de los terrenos en el caso de construcción de edificaciones y viviendas, tanto en la zona de flujo preferente como en toda la zona inundable, conste en el Registro de la Propiedad, para garantizar el conocimiento y la correcta transmisión de esa información a los futuros usuarios de dichas construcciones.



Figura 14. Resumen de las limitaciones de usos tras la modificación del RDPH. Fuente: folleto informativo los usos en las zonas inundables: Directiva de Inundaciones, Ley de Aguas y Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

Otro de los objetivos de los planes es la mejora del conocimiento como pilar de una adecuada gestión del riesgo. Uno de los aspectos al que se está destinando un mayor esfuerzo es el estudio de los efectos

del cambio climático. En este ámbito se está colaborando con instituciones y organismos como el CSIC, la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad Politécnica de Madrid, el CEDEX o el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria y en el marco del Plan PIMA Adapta**,** se ha elaborado una metodología para la consideración de los efectos del cambio climático en la revisión de 2018 de la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI), tal como exige la propia Directiva. También se ha realizado una revisión bibliográfica de todos los estudios disponibles a escala global y europea en esta materia, estando ambos trabajos disponibles en la web del MITERD.

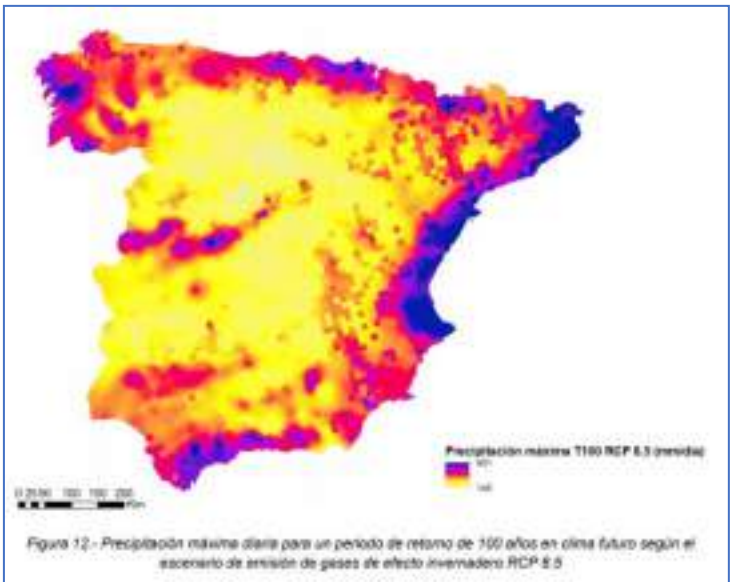


Figura 15. Mapa de precipitación máxima diaria para T100 con cambio climático para el escenario RCP 8.5 para clima futuro 2041-2070. Fuente: estudio “Incorporación del cambio climático en la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) en el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones (2007/60/CE). Metodología general”.

También en este capítulo de mejora del conocimiento, en colaboración con el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX, se está estudiando y actualizando el efecto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas diarias, sobre la ley de frecuencia de caudales máximos diarios y sobre la morfología de la cuenca y de los ríos. Otro de los aspectos en los que se está trabajando es el de las inundaciones pluviales. En la revisión de la EPRI realizada en 2018 se elaboró una metodología para la consideración de las inundaciones pluviales en la identificación de las zonas de riesgo y ahora se está finalizando la caracterización de la peligrosidad y el riesgo por este tipo de inundaciones en 5 casos piloto. Esta línea de trabajo continuará con la elaboración de una guía técnica para el cálculo de las zonas inundables de origen pluvial y la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo.

La mejora de la herramienta matemática de modelización hidrológica e hidráulica Iber es otra de las medidas que se están acometiendo en colaboración con sus creadores, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de A Coruña y CEH del CEDEX, tanto en la implantación de nuevas funcionalidades (integración de la simulación del flujo en redes de drenaje en el subsuelo con el flujo superficial, mejora del módulo de hidrología para poder utilizar Iber como un modelo hidrológico distribuido, creación de módulo de erosión de laderas por escorrentía, mejora del módulo de transporte de sedimentos incorporando granulometría no uniforme) como en la actualización de la interfaz y la mejora de la operatividad de los tiempos de computación. La publicación de esta nueva versión de Iber 3.0 está prevista para finales de 2020.

Una de las medidas de los PGRI es la creación de un grupo de I+D+i de inundaciones, integrado por más de 50 miembros entre universidades, empresas, centros de investigación, etc. y que anualmente celebra una jornada en la que se presentan las novedades más destacadas en distintos campos que tienen una aplicación directa en la gestión del riesgo de inundación. El Ministerio, consciente de la importancia de estas iniciativas apoya y participa, a través de la Dirección General del Agua, en proyectos de I+D+i que desarrollan consorcios público-privados y de los que se derivan resultados relevantes.

Se está realizando la mejora del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), cuyos contenidos se actualizan periódicamente con los últimos estudios disponibles, y que sufrirá una importante actualización durante el tercer trimestre de 2020 al incorporar la revisión y actualización de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación recientemente aprobados, en los que se han revisado parte de los mapas existentes y se ha elaborado nueva cartografía para los nuevos tramos de ARPSI aprobados en el 2º ciclo de la Directiva y para otros tramos considerados de importancia. Además, se ha tratado de mejorar la metodología existente en la elaboración de los mapas de riesgo, especialmente en el cálculo de población estimada en zona inundable y en la localización y clasificación de los elementos vulnerables de acuerdo con las indicaciones de las autoridades de Protección Civil.

En desarrollo del objetivo de mejora del estado de las masas de agua y en materia de prevención se está ejecutando en cada demarcación los programas de mantenimiento y conservación tanto de cauces como del litoral, también incluidos como medida en los PGRI, y que persiguen mejorar las condiciones hidromorfológicas de los cauces y el estado de las costas respectivamente, y de esta forma poder hacer frente en mejores condiciones a los fenómenos extremos, contribuyendo a garantizar la seguridad de personas y bienes. Así, las Confederaciones Hidrográficas dependientes del MITERD invierten aproximadamente más de 20 millones de euros al año para labores de mantenimiento y conservación de cauces en los tramos no urbanos como parte de su actividad ordinaria de gestión del dominio público hidráulico. Igualmente, para mejorar la realización de estas labores de conservación de cauces, atendiendo a esta experiencia se incluyó en los PGRI la elaboración de una Guía de buenas prácticas en conservación de cauces que se publicó en noviembre de 2019 y se puede descargar de la web del Ministerio.

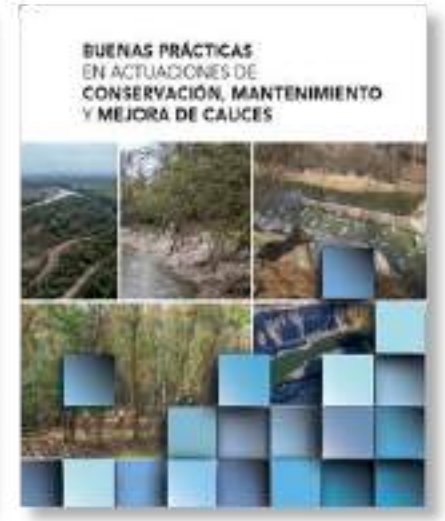


Figura 16. Portada de la Guía de buenas prácticas en conservación de cauces.



Figura 17. Trabajos selvícolas de retirada de un tapón de restos vegetales en el río Manzanares. Fuente: Javier Carpio Fernández del Pozo.



Figura 18. Desbroce de la parte aérea de la caña e instalación de lámina de geotextil para el cubrimiento de la superficie desbrozada en Molina de Segura (Murcia). Fuente: Eduardo Lafuente. CH Segura.



Figura 19. Ejemplo de técnica de "curage": Despeje de la vegetación, apertura de cauces secundarios y labrado de sedimentos en el eje del rio Ebro. Fuente: Alfonso Calvo. CH Ebro.

2.2.2. Medidas protección

Tienen como principal objetivo reducir la peligrosidad y para ello se han reforzado los trabajos en el ámbito de la restauración fluvial, planteándose medidas que contribuyen tanto al incremento de la capacidad del sistema para absorber la inundación y laminar la avenida (retranqueo o eliminación de motas, mejora de la conectividad lateral con las llanuras de inundación, etc.), como a la mejora o al mantenimiento del buen estado de las masas de agua y los hábitats riparios.

En colaboración con la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) con la financiación del Plan PIMA Adapta AGUA, se han puesto en marcha importantes obras de restauración fluvial e infraestructuras verdes reforzando la coordinación entre proyectos ambientales y la disminución de los riesgos de inundación. En lo que llevamos de ciclo se han ejecutado proyectos de restauración fluvial e infraestructuras verdes en el río Ucero en Soria, en el río Manzanares en El Pardo (Madrid), en los ríos Híjar y Ebro en Cantabria, la recuperación llanura inundación en el Canal de la Lobera en Albacete, en el río Arga en Funes (Navarra) (actualmente en ejecución su segunda fase), en el río Bembézar en Córdoba, en el río Segura en Molina de Segura y Alguazas en Murcia y en diversos cauces en la zona sur de la cuenca del Duero. Actualmente están en ejecución actuaciones en los ríos Júcar y Moscas a su paso por Cuenca, en el río Oro y arroyo Farhana en Melilla, en el río Manzanares entre el arroyo de Trofa y el puente de San Fernando (Madrid) y en el río Arga en Funes como se ha mencionado.

De todos estos proyectos de restauración ambiental, destaca el de las "Obras de conexión hidrológica y mejora de hábitat en los meandros del tramo bajo del Arga en Funes", del cual se han completado ya la primera fase, está muy avanzada la segunda y está previsto que antes de final de año comience a ejecutarse la 3ª fase. Se trata de un proyecto muy ambicioso, en términos presupuestarios puesto que supone una inversión en el conjunto de todas sus fases de más de 10 millones de euros, pero también por los múltiples objetivos que persigue, recuperar espacio fluvial para el río Arga, disminuir el riesgo de inundación y mejorar el hábitat fluvial con especial enfoque en la recuperación del visón europeo, cuya población, muy amenazada, se concentra en este territorio. Esta actuación está siendo además un ejemplo de coordinación entre las distintas administraciones central, autonómica y local y ya se ha demostrado con éxito la disminución del riesgo de inundación en el municipio de Funes en las avenidas de 2018 y 2019.



Figura 20. Imagen superior: inundación del Meandro de Soto Sardilla en Funes durante una avenida en el río Arga tras la primera fase del proyecto de restauración del río Arga. Imagen inferior: retirada de una mota en el río Arga durante los trabajos del proyecto. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

Otro proyecto que se puede destacar es el de "Ejecución del Proyecto de disminución del riesgo de inundación y mejora del estado ecológico de los ríos Júcar y Moscas a su paso por Cuenca". Entre los objetivos generales del proyecto está la mejora de la conectividad fluvial, la disminución de riesgo de inundación, fundamentalmente la zona residencial-hospitalaria de la margen derecha, la mejora de la vegetación riparia y la restauración del medio fluvial, combinado con el fomento de un uso público sostenible, dando continuidad a las actuaciones realizadas en la ciudad aguas arriba. Este proyecto también se ha demostrado efectivo en la disminución del riesgo de inundación en la zona residencial-hospitalaria tras la avenida sufrida en diciembre de 2019, tal y como se puede observar en la imagen inferior.



Figura 21. Imagen superior: planta general de actuaciones del proyecto de restauración de los ríos Júcar y Moscas en Cuenca. Imagen inferior: avenida en el río Júcar en Cuenca en el que se puede comprobar cómo, gracias al retranqueo de las motas de defensa y la ampliación del espacio fluvial, se pudo evitar la entrada de agua en las edificaciones, a diferencia de crecidas de años anteriores. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar y MITERD.

Igualmente, en los PGRI figura la redacción de nuevos proyectos de restauración fluvial e infraestructuras verdes, que buscarán, de forma coordinada con todas las administraciones y usuarios, la recuperación de nuestros ríos y la disminución del riesgo de inundación. La mayoría de las propuestas están ya muy avanzadas en su redacción y se espera que a final de 2020 estén redactados más de 30 proyectos para iniciar progresivamente su ejecución en 2021.

En el ámbito de la protección, como un subprograma específico del PGRI de la demarcación hidrográfica del Ebro, se ha redactado una estrategia general de actuaciones para el tramo medio del río Ebro y tramos bajos de sus afluentes (325 km, desde Logroño hasta La Zaida en Zaragoza), y se están estudiando en detalle 15 tramos de alto riesgo de inundación para la redacción de proyectos y posterior ejecución de actuaciones.

Con relación a las obras estructurales, se está realizando un inventario de obras de defensa frente a inundaciones, analizando su funcionalidad y los niveles de seguridad en función de los distintos

escenarios de cambio climático, así como su impacto sobre la hidromorfología. Se han revisado todas las masas de agua superficiales de las cuencas intercomunitarias (64.801 km de cauce) y como resultado de este trabajo se han identificado 14.189 obras de defensa de diferentes tipologías (motas, muros, gaviones, escolleras…) que afectan a 13.655 km de cauce. Complementariamente a este inventario, se está finalizando la redacción de un Manual técnico de gestión de este tipo de infraestructuras de defensa tan frecuente en nuestros cauces que viene a completar el vacío existente respecto a la evaluación y mejora de la seguridad de estas obras, estableciendo criterios de diseño, constructivos y de mantenimiento, identificando procesos de deterioro y modos de fallo más comunes, gestión en situación de emergencia, etc., de modo similar a otras obras estructurales de defensa y también de acuerdo a la experiencia de países de nuestro entorno.

Además, se está llevando a cabo la identificación y el análisis de tramos afectados por infraestructuras lineales con insuficiente drenaje transversal apoyándose en los trabajos de revisión de la EPRI y la información de los mapas de peligrosidad y riesgo para establecer una propuesta y priorización de actuaciones. En este sentido, una de las primeras medidas de los PGRI aprobados para tratar de mejorar el drenaje de las infraestructuras lineales fue la actualización de la norma 5.2 - IC de drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras, Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero por el Ministerio de Fomento y en la que, fruto de la colaboración en el grupo de trabajo español de inundaciones, ya se recogen las determinaciones sobre criterios de diseño y conservación de obras de paso que se aprobarían en la modificación del RDPH de diciembre de 2016.

Por otro lado, desde mediados de 2018 la Dirección General del Agua del MITERD está realizando los estudios de viabilidad, coste-beneficio y priorización de las obras estructurales de defensa frente a inundaciones (como nuevos encauzamientos o presas de retención de avenidas) incluidas en los PGRI y en los planes hidrológicos de cuenca para la ejecución en su caso en los planes de segundo ciclo. Con ello se busca tener la absoluta certeza de que este tipo de infraestructuras, por su impacto ambiental y por su elevado coste económico y social, solo se van a llevar a cabo, en su caso, cuando esté plenamente justificada su necesidad y haya un consenso generalizado entre todos los sectores implicados, garantizando además el cumplimiento de toda la normativa europea. Se ha finalizado ya la primera fase de este trabajo que concluye con el diagnóstico sobre 30 de estas obras, y se está iniciando la segunda fase de este trabajo.

2.2.3. Medidas preparación

Con el objetivo de incrementar la percepción del riesgo de inundación y de las estrategias de autoprotección en la población, en los agentes sociales y económicos, se están llevando a cabo jornadas y campañas formativas/informativas en cada demarcación para concienciar a la población ante el riesgo de inundaciones. Uno de los aspectos que también se está trabajando es el de la comunicación del riesgo, con contenidos específicos adaptados al público objetivo y recursos fundamentalmente audiovisuales.

Además, en noviembre de 2019 se publicaron cuatro guías de adaptación al riesgo de inundación, como continuación de la Guía sobre la Reducción de la Vulnerabilidad de Edificios frente a Inundaciones, elaborada en el marco del convenio entre la Dirección General del Agua y el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) y publicada en julio de 2017. En el proceso de elaboración de estas guías se ha contado con los sectores implicados y se están aplicando a diferentes casos piloto representativos de cada tipología de elemento vulnerable.



Figura 22. Portadas de las Guías de adaptación al riesgo de inundación.

- Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras
- Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas
- Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables
- Sistemas urbanos de drenaje sostenible

Para mejorar la capacidad predictiva ante situaciones de avenida e inundaciones, se trabaja en varios niveles. Por un lado, se realiza el habitual trabajo de mantenimiento en las redes de medida y de alerta hidrológica, que cuentan con unos 3.000 puntos de medición. Paralelamente se están llevando a cabo procesos de modernización e integración de las redes existentes en un único Sistema Automático de información (SAI) en aquellas demarcaciones en que no estaba incorporada y se están realizando además trabajos para la optimización de las redes, implantando nuevas estaciones de medida si es necesario. Destaca por ejemplo la mejora prevista en la Confederación Hidrográfica del Cantábrico con 34 nuevas estaciones del SAI, 131 nuevos pluviómetros, un nuevo centro de control y la puesta en marcha de un Sistema de Ayuda a la Decisión como sistema de alerta temprana.

También es de destacar el diseño de protocolos de comunicación y estudio piloto para la implementación de los protocolos de alerta hidrológica. Tras el establecimiento de la metodología básica de los avisos hidrológicos, se ha continuado avanzando en la selección de estaciones de aforo piloto y en el establecimiento de umbrales y en los protocolos de comunicación entre administraciones que, conjuntamente con los mapas de zonas inundables, van a permitir generar en un futuro un sistema de alerta por posibles episodios de inundación coordinado con la AEMET.

Por su parte, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), dentro de las medidas de su competencia para la mejora de los sistemas de alerta meteorológica, está trabajando en el desarrollo del Plan Meteoalerta, la ampliación de los fenómenos objeto de aviso y en la coordinación con otros

organismos. En este sentido se establece un proyecto para la recopilación de requerimientos de las protecciones civiles autonómicas, a través de grupos de trabajo, cuyas conclusiones se implementarán en Meteoalerta durante 2020 y entre los temas en estudio está la conveniencia de ofrecer avisos de precipitación acumulada (24, 48 y 72h). También es responsable de la mejora de la difusión y divulgación de las predicciones de fenómenos meteorológicos adversos, por ejemplo, a partir de la geolocalización del usuario a través de la aplicación de móvil y web institucionales de AEMET.

En materia de prevención, los organismos autonómicos de Protección Civil están revisando los Planes especiales a nivel autonómico de Protección Civil frente al riesgo de inundación para su actualización al contenido de los PGRI. Además, las comunidades autónomas que tenían pendiente la homologación de sus Planes especiales ya los han aprobado. También los organismos de Protección Civil están promoviendo la realización de planes de actuación local o están realizando campañas de divulgación y concienciación.

2.2.4. Medidas recuperación y evaluación

Para hacer frente a los episodios de inundación sucedidos, desde la Dirección General del Agua y la Dirección General de la Costa y el Mar del MITERD se habilitan de forma periódica partidas presupuestarias para la realización de obras de emergencia para la reparación de infraestructuras afectadas incluyendo infraestructuras sanitarias y ambientales básicas.

Existe además desde 2016 una colaboración entre la Dirección General del Agua del MITERD y la Unidad Militar de Emergencias (UME) para el desarrollo de programas específicos de formación en materia de gestión de riesgos de inundación y la realización de los simulacros de activación de los planes estatales de riesgos. En este sentido, se ha colaborado en los ejercicios de Cantabria 2017, simulacro declaración de emergencia nacional por inundaciones, y en los ejercicios conjuntos combinados de Región de Murcia 2018 donde se simuló un escenario de catástrofe por riesgo sísmico, que produce una serie de riegos derivados, entre los que figuran las inundaciones; y de Aragón 2019 donde se simularon escenarios de inundaciones, con una serie de riegos derivados, medioambientales y tecnológicos. También con el fin de probar y mejorar los procedimientos operativos de las capacidades de respuesta del Sistema Nacional de Protección Civil ante una emergencia causada por inundaciones, la Dirección General de Protección Civil y Emergencias del Ministerio del Interior realizó en octubre de 2018 el simulacro RIWATEREX 2018 en el marco del Mecanismo Europeo de Protección Civil.

Cabe destacar también la labor del sector del seguro en la gestión de riesgo de inundación. El Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) indemniza con una media de unos 200 millones de euros al año a los afectados por inundaciones que tengan bienes asegurados (aunque en 2019 la cifra ha sido muy superior). Como ya se ha mencionado, existe un convenio específico de colaboración suscrito entre la Dirección General del Agua y el CCS para el desarrollo de medidas de prevención y mitigación del riesgo de inundación incluidas en los PGRI, en el que se publicó una Guía y se celebraron varias jornadas de divulgación. Adicionalmente, para promocionar el seguro, el CCS, en cooperación con la Unión Española de Entidades Aseguradoras y Reaseguradoras (UNESPA), ha puesto en marcha la campaña "Estamos Seguros". Además, el CCS extendió en julio de 2017 la cobertura de los riesgos extraordinarios a todo el parque automovilístico con el seguro obligatorio, conjuntamente con la reducción de la tarifa para automóviles. Destacar que la siniestralidad acaecida en 2019 ha obligado al CCS a adoptar medidas organizativas excepcionales para gestionar de forma ágil las indemnizaciones de decenas de miles de afectados, como la posibilidad de realizar de forma telefónica y directa la solicitud de indemnización, el despliegue de un gran número de peritos o la aprobación, en beneficio de los afectados, de criterios específicos para la valoración de los daños y para la tramitación de los siniestros adaptados a la magnitud excepcional de la inundación.

Por su parte, en el ámbito agropecuario, la Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA) está ejecutando las medidas del PGRI de su competencia en materia de seguros agrarios. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, a través de ENESA subvenciona con aproximadamente 200 millones de euros al año las pólizas de seguros agrarios que permiten a los agricultores y ganaderos, a través de Agroseguro recibir indemnizaciones tras los episodios de inundación. En los últimos años, los Planes de Seguros Agrarios han mantenido el nivel de subvención a la suscripción del seguro agrario, y el perfeccionamiento de las coberturas, así como la reducción del precio. Además, ENESA promueve la promoción del aseguramiento y la información a través de su página web, renovada en 2018 para mejorar y dar mayor visibilidad a la información ofrecida, a través de las redes sociales y de la participación en jornadas divulgativas.

Otra de las medidas clave de los PGRI en esta fase es la evaluación, análisis y diagnóstico de las lecciones aprendidas en la gestión de los eventos de inundación. Por el momento la Dirección General del Agua ha realizado dos informes piloto, relativo a dos episodios el de la localidad de Cebolla (Toledo) en septiembre de 2018 y el que tuvo lugar en Tafalla y Olite, como principales localidades afectadas, en el mes de julio de 2019.

3. EL SEGUIMIENTO DE LA IMPLANTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LOS P.G.R.I.: LOS INFORMES ANUALES DE SEGUIMIENTO

Para evaluar el logro de los objetivos y los avances realizados, los PGRI incluyen una serie de indicadores cuantitativos y cualitativos que dan razón del grado de ejecución de las medidas y por tanto del progreso del Plan. Así, desde 2016, se publica un informe anual de seguimiento de cada PGRI que muestra en detalle el estado de implantación de las medidas y la cuantificación de los indicadores asociados, detalla las actuaciones más relevantes realizadas por las distintas administraciones y los eventos de inundación acaecidos en el período, desde el punto de vista de las distintas administraciones responsables. Estos informes se encuentran disponibles en la web del MITERD. Además, a finales de 2019, también se publicó un informe de evaluación de mitad de ciclo (años 2016, 2017 y 2018) de las demarcaciones intercomunitarias en el que se resumía y analizaba a nivel nacional la implantación de los PGRI.

Los informes de seguimiento de los PGRI se consideran fundamentales para conocer el progreso de la ejecución y consecución de los objetivos de los PGRI, mejorar su implantación a través del registro de lo realizado y como herramienta de transparencia para las distintas administraciones y público en general.

A partir de los informes anuales de seguimiento publicados y del informe de evaluación de mitad de ciclo (años 2016, 2017 y 2018), se pueden extraer algunos datos relevantes sobre el estado de implantación de las medidas y los valores de sus indicadores. Este ejercicio también proporciona información sobre la eficacia de las distintas medidas para el logro de los objetivos y la bondad de las variables seleccionadas para medirla, de forma que se tenga en cuenta para futuras actualizaciones. Actualmente, se están finalizando los informes de seguimiento de 2019 de forma que los datos que a continuación se presentan son provisionales.

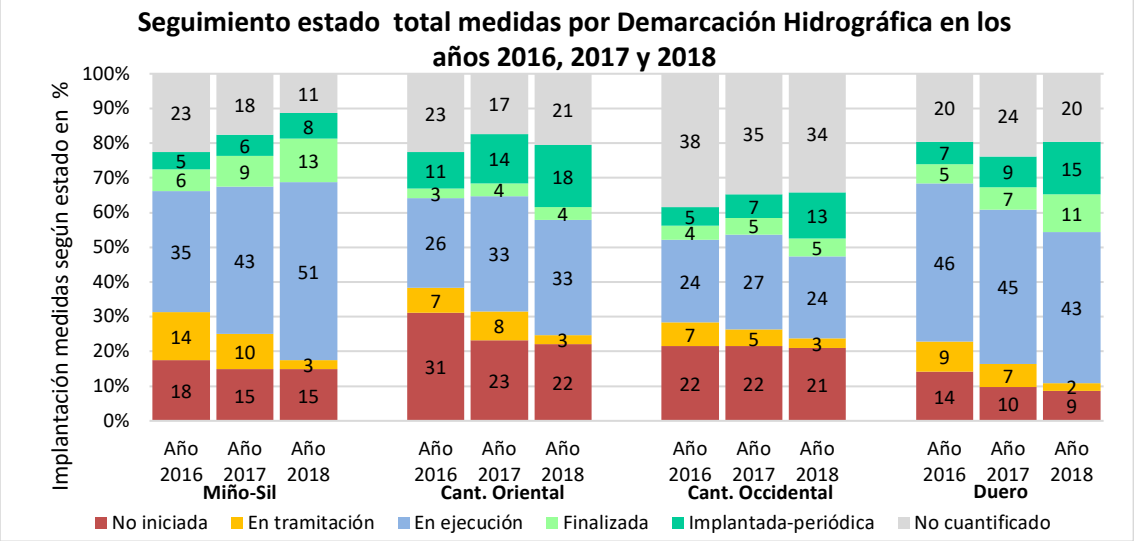
3.1. Resumen global del estado de la implantación de las medidas

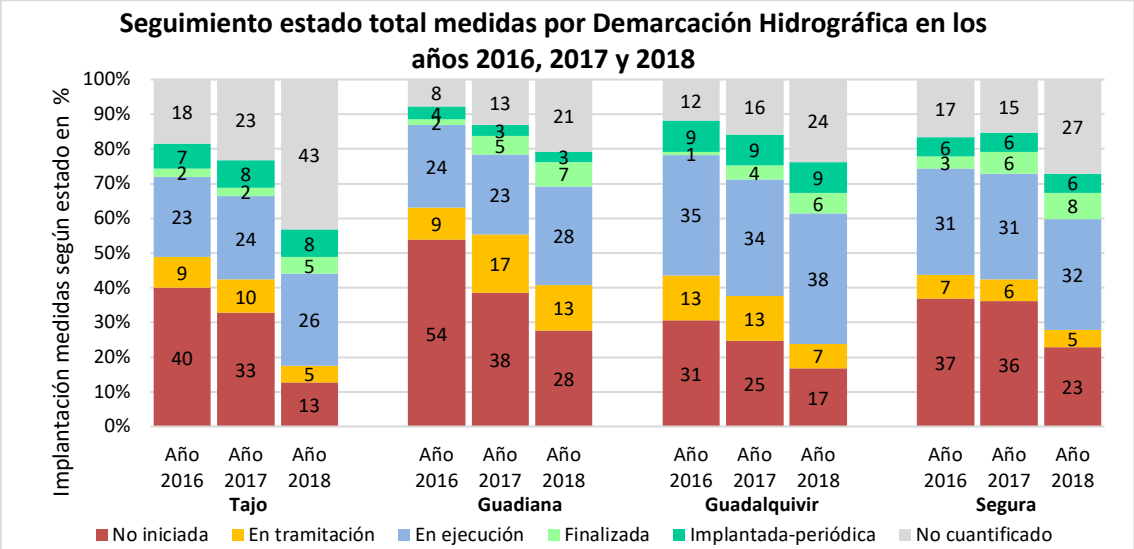
En los informes de seguimiento se analiza el grado de implantación de las medidas recogidas en los programas de medidas de los PGRI según 6 posibles estados:

- Medidas con estado “No iniciada”: todavía no se ha realizado ninguna actuación con relación a la puesta en marcha de la medida.

- Medidas con estado "En tramitación": se ha iniciado algún trámite administrativo previo para la ejecución de la medida: tramitación ambiental (proyectos), solicitud de autorización (Pliego de prescripciones técnicas (PPT), proyecto). Esta fase se prolonga hasta que se han superado todos los trámites administrativos preceptivos y el expediente está en fase económica de contratación, una vez confirmada disponibilidad presupuestaria.
- Medidas con estado "En ejecución": la medida está en marcha:
  - Se ha firmado un convenio.
  - Está en ejecución incluida en los planes de actuación del organismo para el período de aplicación del PGRI.
  - Se ha contratado (proyecto, PPT).
- Medidas con estado "Finalizado": medidas ya ejecutadas (por ejemplo, un proyecto finalizado, una norma legal publicada, etc.).
- Medidas con estado "implantada-periódica": medidas que forman parte de la actividad ordinaria y habitual de los distintos organismos implicados en el PGRI (no necesitan ninguna actuación adicional para su ejecución).
- Medidas "Sin información": no se dispone de información sobre su nivel de implementación

En los siguientes gráficos se detalla la evolución del estado de la implantación de las medidas en el caso de las demarcaciones intercomunitarias en el período 2016-2018:





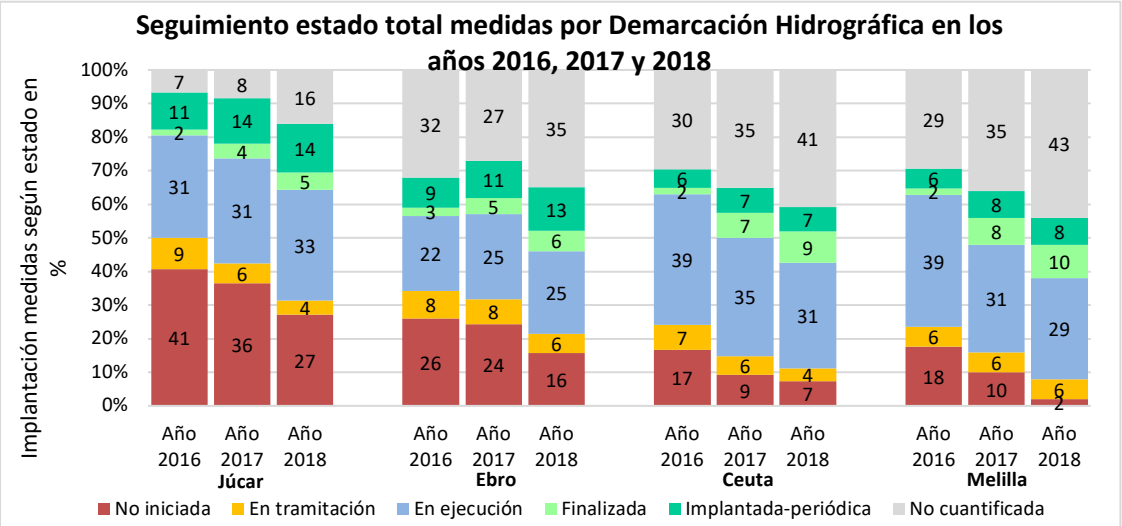


Figura 12. Evolución del estado de implantación de medidas en el caso de las demarcaciones intercomunitarias en el período 2016-2018.

3.2. Resumen global de los valores de algunos indicadores destacados

A continuación, se muestran algunos ejemplos de los valores de indicadores que recogen los PGRI. Para cada indicador se establece un valor base 2015, correspondiente al inicio del período de planificación y un valor esperado a 2021, que constituye el objetivo del Plan, si bien en la mayoría de ellos no puede establecerse un objetivo cuantificado.

Los siguientes datos muestran, por ejemplo, el importante trabajo que realizan las demarcaciones en el ámbito de la ordenación del territorio con la emisión de los informes urbanísticos de acuerdo al artículo 25.4 del Texto Refundido de la Ley de Aguas para asegurar el cumplimiento de la legislación en materia de aguas de los actos o planes de las administraciones locales y autonómicas; los kilómetros de cartografía disponibles en cauces, que previsiblemente experimentará un aumento notable en los años 2019 y 2020 con la actualización de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación; el aumento progresivo en la inversión en mantenimiento y conservación de cauces; el gran número de puntos de medida y control, fundamentales para la previsión de avenidas y cuya red en algunas demarcaciones está sufriendo una mejora de la optimización y eficiencia eliminando puntos duplicados y mejorando la automatización; o el aumento notable en las indemnizaciones pagadas por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) en el año 2019, principalmente como consecuencia de los graves daños ocasionados por la DANA en septiembre de 2019 en el sureste peninsular.

Nombre / Descripción indicador	Valor base 2015	Valor 2016	Valor 2017	Valor 2018	Valor 2019 (*)	Valor esperado 2021
Nº de informes urbanísticos emitidos por los Organismos de cuenca en relación con el artículo 25.4	**1.609**	**2.099**	**1.903**	**2.366**	**1.774**	**-**
Km de cauce con cartografía de zonas inundables disponibles en los visores cartográficos existentes	**16.535**	**19.098**	**19.318**	**20.650**	**13.277**	**23.410**
Inversión anual en mantenimiento y conservación de cauces. Presupuesto empleado para la ejecución de las actuaciones (en millones de euros)	**23,63**	**15,5**	**28,85**	**34,39**	**36,24**	**64,9**
N° de puntos de medida y control operativos y funcionales	**2.853**	**3.037**	**3.112**	**3.092**	**1.707**	**3.096**
Indemnizaciones por daños causados por inundaciones en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica (Cálculo a partir de los datos provinciales proporcionados por el CCS) (en millones de euros)	**128,14**	**81,03**	**46,76**	**99,77**	**597,02**	**N/P**

Tabla 6. Valores de indicadores que recogen los PGRI. N/P = No procede, (*) dato provisional.

4. PRÓXIMOS TRABAJOS

Está a punto de iniciarse la revisión y actualización de los PGRI, para lo cual se tendrá en cuenta, la experiencia en la implantación del primer ciclo, las recomendaciones de la Comisión Europea y el Tribunal de Cuentas Europeo como resultado de las evaluaciones realizadas a los planes españoles, y el avance de la técnica y el conocimiento que ponen a nuestra disposición nuevos recursos para mejorar la gestión del riesgo en sus múltiples aspectos.

Algunos de los retos que, a pesar de los avances, permanecen y requerirán un esfuerzo por parte de todos los actores implicados para abordarlos en este segundo ciclo, son los siguientes:

- Incrementar la percepción del riesgo de inundación entre la población y los sectores económicos afectados y mejorar en las estrategias de autoprotección sigue siendo clave para reducir los daños que producen las inundaciones. Para ello es necesario seguir realizando nueva cartografía de peligrosidad y riesgo mejorando la información ofrecida sobre elementos vulnerables, así como aprovechar el papel que pueden desempeñar los medios de

comunicación en la difusión de mensajes relativos a la gestión de las inundaciones y en la realización de campañas divulgativas.

- Mejorar los protocolos de comunicación y de los sistemas de información hidrológica y su coordinación con la información meteorológica, con el objetivo de generar previsiones y alertas a corto y medio plazo de crecidas e inundaciones y de sus efectos, de forma que las autoridades de Protección Civil, ciudadanos y agentes económicos puedan tener el tiempo suficiente para tomar medidas de autoprotección. Explorar y aprovechar las potencialidades que presentan las redes sociales en la gestión de la emergencia.

- Mejorar la consideración del riesgo de inundación en la ordenación del territorio y la planificación urbana a través de la adaptación de la normativa municipal y autonómica, de la aplicación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico en materia de limitaciones a los usos en las zonas inundables o de la elaboración de normativa sobre criterios constructivos en zonas con riesgo de inundación.
- Incrementar la colaboración con el sector científico en todo lo concerniente a la aplicación de nuevas tecnologías para la optimización de la gestión del riesgo de inundación, fundamentalmente en lo relativo a producción de cartografía, predicción y emisión de alertas.

- Evaluar de forma sistemática la gestión realizada en los episodios sucedidos y extraer conclusiones para mejorar en el futuro realizando informes de evaluación de lecciones aprendidas que contemplen todos los aspectos e incluyan a todos los actores implicados.

REFERENCIAS

- Comisión Europea (2007). Directiva 2007/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.
- Gobierno de España (2010). Real Decreto 903/2010, de 9 de julio de evaluación y gestión de riesgos de inundación.
- Informes anuales de seguimiento de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación en cada demarcación hidrográfica intercomunitaria, años 2016, 2017 y 2018.
- Informes de seguimiento de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias. Evaluación mitad de ciclo, años 2016, 2017 y 2018.
- MAPAMA (2017). Los usos en las zonas inundables: Directiva de Inundaciones, Ley de Aguas y Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Folleto informativo. MAPAMA, Madrid.
- MITECO (2020). Página web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, apartado gestión del riesgo de inundación. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/

INUNDABILIDAD Y PLANIFICACIÓN URBANISTICA: HACIA EL ACLOPLAMIENTO DE LA CIUDAD A LA MATRIZ BIOFÍSICA DEL TERRITORIO

Pedro Górgolas
Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Universidad de Sevilla
gorgolas@us.es
https://orcid.org/0000-0001-9401-9041

RESUMEN

El proceso de artificialización territorial acaecido en España en las últimas décadas ha ocasionado importantes problemas ambientales, especialmente agudos en materia de funcionamiento del ciclo natural del agua, que se ha visto profundamente alterado. Las tasas de impermeabilización subsecuentes al modelo de urbanización que ha dominado la producción de ciudad, han devenido la necesidad de acometer, recurrentemente, acciones regulatorias del régimen hídrico al objeto de atemperar, mitigar o evitar los peligros de avenidas causados por las disfunciones situacionales de núcleos de población, desfigurando la morfología de los cauces fluviales y sus llanuras de inundación que, en no pocos casos, se han visto colonizadas por actividades urbanas. Invertir este protocolo operacional resulta perentorio y, para ello, se precisa reformular el planeamiento urbanístico vigente expresivo, mayoritariamente, del aliento expansivo inyectado por la última burbuja inmobiliaria. En el horizonte axiomático que se vislumbra para impulsar un cambio de ciclo en la cultura de la planificación urbanística surgen dos principios protagónicos de especial relevancia para garantizar el acoplamiento eficiente del medio urbano a la matriz biofísica de su soporte territorial: la Infraestructura Verde y la adopción de un marco de directrices direccionado a fomentar una "ordenación del medio urbano sensible al agua". Para contextualizar y constatar su aplicación, se ha seleccionado el caso de estudio del Nuevo Plan General de Palma. El texto concluye advirtiendo de la imperiosa necesidad de acometer la solución de la problemática anexada al afloramiento de una "periferia fraudulenta" constituida por asentamientos irregulares emplazados en suelo rústico, patología territorial agravada por el hecho de que, en numerosas ocasiones, estos enclaves se localizan en zonas afectadas por riesgos de inundación.

1. PREÁMBULO: OCUPACIÓN ARTIFICIAL DEL SUELO, EFECTOS EN CICLO URBANO DEL AGUA Y PLANEAMIENTO URBANÍSTICO

Las ciudades han experimentado una gran expansión a largo del siglo XX, en muchos casos descontrolada, en la que su tasa de antropización ha sido superior a la del crecimiento demográfico. A consecuencia de ello, «la ratio de personas por hectárea se ha reducido a la mitad desde 1990, ocasionando dramáticas consecuencias para la sostenibilidad urbana y medioambiental» (Ezquiaga, 2020: 180). En el marco de la Unión Europea (UE), según datos proporcionados por la Agencia Europea de Medio Ambiente (Comisión Europea, 2012: 42), la intensidad de la ocupación de suelo detectada entre 1990 y 2000 fue de 1.000 km2 cada año (una superficie mayor que la de la ciudad de Berlín) o 275 hectáreas al día, y los núcleos de población aumentaron alrededor de un 6 %. Entre 2000 y 2006, el ritmo de ocupación disminuyó ligeramente para situarse en 920 km2 al año (252 hectáreas al día), mientras que la superficie total urbanizada se incrementó en un 3 % más. Esto equivale a un aumento de prácticamente el 9 % entre 1990 y 2006 (de 176.000 km2 a 191.200 km2).

En 2006, la superficie media urbanizada por ciudadano de la UE ascendía a, aproximadamente, 390 m2, lo que supone 15 m2 más (un 3,8 %) que en 1990. De esta cifra, la correspondiente a suelo sellado es de 200 m2 por ciudadano.

En el caso español, el Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE, 2016 a), confirma que, a partir de nuestra incorporación a la Unión Europea, se observan rápidos cambios en la ocupación de suelo, especialmente intensos en los estertores de la última burbuja inmobiliaria. Así, si en 1987 nuestra superficie artificial era de 800.000 hectáreas, en el transcurso de 24 años -es decir, a fecha de 2011- se han artificializado un total de 400.000 hectáreas adicionales. En este periodo, la tasa media de incremento de superficie artificial ha sido de 51 hectáreas diarias, cifra que se eleva hasta las 109 hectáreas/día en el tramo 2005-2011. Los 1,2 millones de hectáreas que conforman la superficie artificial total española suponen una ratio de 27 hectáreas por cada mil habitantes. La específicamente destinada a usos urbanos es de 706.332,64 hectáreas, lo que representa una proporción de 15,09 hectáreas/1.000 habitantes. La Comunidad Autónoma de Andalucía es la que ha experimentado una mayor tasa de antropización. Su superficie artificial -234.310,8 hectáreas- se ha incrementado en este cuarto de siglo en un 71,13%, a un ritmo de 11,12 hectáreas diarias, llegando a alcanzar un valor de 27,99 hectáreas/1.000 habitantes. Esta pauta de aumento es muy superior a la de otros escenarios territoriales significados por su notable dependencia inmobiliaria como, por ejemplo, la Región Valenciana (7,06 hectáreas/día), la Comunidad de Madrid (6,47 hectáreas/día) o la Región de Murcia (2,39 hectáreas/día). Una de las consecuencias provocadas por este proceso ha sido el aumento exponencial de la huella ecológica española cuyo «ritmo medio de crecimiento diario entre 1995 y 2005 fue de 2,7 metros cuadrados por persona, equivalente a la superficie de 12.000 campos de fútbol» (Gobierno de España, 2008: 31). En 2005, el valor de este indicador se situaba en 6,4 hectáreas per cápita, 3,6 veces superior a la biocapacidad mundial (1,78 hectáreas per cápita).

Esta expansión del área artificializada ha provocado una progresiva e imparable impermeabilización, ocasionando numerosos problemas medioambientales, especialmente palmarios en materia de gestión del agua e incremento de los riesgos de inundación. Tal es la trascendencia de este fenómeno, que la Comisión Europea ha elaborado un documento de "directrices sobre mejoras prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo" (Comisión Europea, 2012). Entre los principales efectos causados en el medio urbano por esta "dinámica impermeabilizadora", siguiendo la reflexión realizada por Rodríguez Rojas para la Guía "Nueva Cultura del Agua"[1], cabe destacar: (a) *el efecto "isla de calor*", ya que *l*a inhibición total o parcial de la infiltración del agua de lluvia reduce la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en el subsuelo anulando la refrigeración natural., (b) *la contaminación de las aguas*, toda vez que el sellado del suelo elimina su capacidad filtrante y depurativa, por lo que la multitud de contaminantes que generan las actividades humanas (aceites, fertilizantes, pesticidas, etc.) acaban llegando a ríos y acuíferos generando un grave problema ambiental, y (c) *la probabilidad de inundaciones*, al confirmarse que las áreas edificadas pueden ser hasta 4 veces más impermeables que las zonas verdes o las parcelas sin edificar, por lo que el modelo de urbanización empleado condicionará directamente la cantidad de agua infiltrada.

Estos problemas podrían solucionarse desarrollando estrategias operacionales que, por un lado, limiten la artificialización de nuevo suelo rural y, por otro, mitiguen los efectos del sellado existente en el suelo urbano incrementando su índice de permeabilidad, fomentando la Infraestructura Verde y generalizando los sistemas naturales de captación de agua (Comisión Europea, 2012: 7)[2]. Y ello

[1]https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/el-agua-en-el-medio-urbano/diseno-urbano-sensible-al-agua (Consulta: 8/07/2020).

[2] Un ejemplo paradigmático de esta estrategia de actuación es la iniciativa Ekostaden Augustenborg, uno de los proyectos más ambiciosos de los llevados a cabo en Suecia en materia de renovación urbana sostenible. En este caso, se instalaron, por ejemplo, 10 000 m2 de tejados verdes y se construyó un sistema abierto de aguas pluviales, además de atractivos espacios verdes para mejorar el entorno tanto para las personas como para la naturaleza (Comisión Europea, 2014: 17).

otorga, para su implementación, un rol protagónico al impulso de una nueva cultura de la planificación que coadyuve a proyectar una ciudad ambientalmente cualificada, funcionalmente diversa, homogéneamente equipada, socialmente cohesionada y metabólicamente eficiente asegurando, ante todo, la salvaguarda del interés colectivo. Este cambio de rumbo, permitirá el afloramiento de un planeamiento general guiado por nuevos impulsos que eviten la expansión urbana innecesaria apostando, principalmente, por la regeneración integral de la ciudad, por su crecimiento interno en sentido cualitativo y por la defensa activa de los factores esenciales de la vida urbana (Campos Venutti, 1981)

2. CAMBIO DE CICLO EN EL PLANEAMIENTO URBANÍSTICO: LA NECESIDAD DE LIMITAR EL SELLADO DE NUEVO SUELO RURAL Y MITIGAR LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO URBANIZADO

En España, más de 6.000 municipios -el 74% del total- cuentan con su instrumento de planeamiento general aprobado con anterioridad a la legislación urbanística vigente en sus respectivas Comunidades Autónomas (Lobato, 2020: 202). Ello significa que sus modelos urbano-territoriales fueron ideados, mayoritariamente, en pleno frenesí de la última burbuja inmobiliaria (1997-2007). Esta sorprendente inacción deviene del estado letárgico que ha caracterizado la política urbanística desarrollada por nuestras administraciones públicas durante el periodo de crisis económica posburbuja, lo cual parece colegir un posicionamiento favorable a perseverar en un "urbanismo reincidente" que favorezca la reactivación del sector inmobiliario, una vez ha vuelto a renacer de sus cenizas para liderar, a partir de 2014, la recuperación económica. Esta condescendencia con los protocolos de actuación característicos del neoliberalismo, está incitando a prorrogar la validez del planeamiento urbanístico gestado durante la última burbuja inmobiliaria, inductor de modelos urbano-territoriales bulímicos -a efectos de colonización espacial- y anoréxicos en términos de densidad residencial y diversidad funcional[3].

Sin embargo, frente a este posicionamiento anuente y acomodaticio, la preocupante obsolescencia del planeamiento municipal vigente debe estimular su reformulación impregnándose de nuevos principios de ordenación urbanística que permitan restañar las heridas causadas por el legado territorial de la última burbuja inmobiliaria, caracterizado por una triple deriva: de la compacidad a la dispersión, de la complejidad a la zonificación monofuncional y de la sociodiversidad a la segregación territorial de los grupos sociales (Nel-Lo, 2002: 123). Reforzando esta afirmación, la Agenda Urbana Española 2019 (AUE/2019), documento referencial de trascendental interés, advierte que los valores ingénitos al ADN del modelo urbano español (compacidad, densidad cualificada, complejidad, mezcla de usos, espacio público integrador, diversidad social) «han sido ignorados en los desarrollos urbanos de la periferia de muchas ciudades, con esquemas anodinos, ajenos a su cultura y carentes de identidad» (Gobierno de España, 2019: 12).

Para revertir esta trayectoria inercial claramente insostenible, la AUE/2019 define un conjunto de Objetivos Estratégicos, entre los que deben enfatizarse los siguientes: (a) el Objetivo Estratégico 1 referido a "ordenar el territorio y hacer un uso racional del suelo, conservarlo y protegerlo". Para ello, se requiere reducir el consumo de suelo virgen adecuándolo a las dinámicas de la población y a las nuevas actividades económicas, fomentando la productividad del suelo ya transformado, y (b) el Objetivo Estratégico 2, que desarrolla un conjunto de finalidades específicas destinadas a "evitar la

[3] El estudio "Áreas urbanas + 50" (Ministerio de Fomento, 2013) desvela que en las once principales Áreas Urbanas españolas, existe un importante volumen de suelo destinado a desarrollo urbanístico -por encima del 50% de las 100.806,69 ha totales- que aún no ha iniciado el proceso de urbanización. Su densidad media, 19,60 viviendas/hectárea, indica un claro predominio de la vivienda unifamiliar lo cual deviene unas expectativas de consumo de territorio que cabe adjetivar de excesivas.

dispersión urbana y revitalizar la ciudad existente". Al tiempo, entre las líneas de actuación establecidas en su Objetivo Estratégico 3, orientado a "prevenir y reducir los impactos del cambio climático y mejorar la resiliencia", destacan: (a) desarrollar un planeamiento sectorial, territorial y urbanístico que responda a la prevención frente a los riesgos naturales, (b) incorporar mapas de riesgos naturales al planeamiento, de manera que se eviten actuaciones de transformación urbana que sean susceptibles de verse afectadas por inundaciones, lluvias torrenciales, elevación del nivel del mar, insuficiencia hídrica, riesgo de deslizamiento de tierras, etc., y (c) fomentar las actuaciones de prevención y adaptación en aquellos suelos urbanizados susceptibles de ser afectados por riesgos naturales.

En los subapartados siguientes se profundizará en dos principios básicos de planificación urbano-territorial -la Infraestructura Verde y la ordenación urbana sensible al agua- de especial significación para, por un lado, conseguir acoplar la ciudad a la matriz biofísica de su soporte territorial -minimizando el sellado de nuevo suelo rural y garantizando la protección, entre otros espacios a preservar, de la red hidrográfica que discurre por el municipio y sus llanuras aluviales- y, por otro, mejorar los indicadores ecológicos del espacio urbano explicitando directrices direccionadas a invertir la impermeabilización del suelo urbanizado -mediante la aplicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)- y mejorar el "índice biótico del suelo" en actuaciones de transformación urbanística de nueva urbanización. El caso de estudio seleccionado para visualizar la instrumentación de estas medidas ha sido el Nuevo Plan General de Palma (Mallorca. Islas Baleares), del que se encuentran formulados su Documento Borrador y el Documento Inicial Ambiental al objeto de impulsar el procedimiento de su Evaluación Ambiental Estratégica.

2.1. La Infraestructura Verde del Territorio: un concepto clave para acoplar la ciudad a la matriz biofísica de su soporte territorial

> *El espacio libre ha sido definido por pasiva durante mucho tiempo, lo que le ha conferido ese aire marginal propio de las cosas restantes. Como los "invertebrados" o el "espacio no urbanizable", parecía definirse como lo que no era. Era libre, aún. O sea, libre porque todavía no había sido ennoblecido con la ocupación. Esta percepción está cambiando muy deprisa, por fortuna. Libre no significa vacío. Libre significa lleno de espacio. El espacio libre es el espacio lleno de espacio, o sea, el espacio propiamente dicho. (...) El espacio libre viene a ser la matriz aflorante. Utilizando el símil de un texto impreso sobre una página blanca, el espacio libre es el fondo blanco que, en definitiva, es lo que permite ver el negro de las letras (el espacio ocupado)* (Folch, 2003: 35).

En mayo de 2011, la Unión Europea aprobó una estrategia -estructurada en torno a seis objetivos- para tratar de detener la pérdida de biodiversidad en su territorio. El objetivo 2 persigue garantizar el mantenimiento y mejora de ecosistemas mediante la creacion de una Infraestructura Verde (Comisión Europea, 2014: 15). Posteriormente, el 6 de mayo de 2013 lanza la Comunicación "Infraestructura Verde: mejora del capital natural de Europa", definiéndola como una herramienta de eficacia probada que aporta beneficios ecológicos, económicos y sociales, compuesta por «una red de zonas naturales y seminaturales y de otros elementos ambientales, planificada de forma estratégica, diseñada y gestionada para la prestación de una extensa gama de servicios ecosistémicos. Incorpora espacios verdes (o azules en el caso de los ecosistemas acuáticos) y otros elementos físicos de espacios terrestres (incluidas las zonas costeras) y marinos» (Comisión Europea, 2013: 3). Entre los rendimientos a aportar por la Infraestructura Verde destaca su contribución al desarrollo de políticas de adaptación- mitigación del cambio climático y gestión del riesgo de catástrofes, a través de soluciones como llanuras de inundación funcionales, bosques ribereños, bosques de protección en zonas montañosas, cordones litorales o humedales costeros (Ibid.: 5). Finalmente, el documento divulgativo "Construir una Infraestructura Verde para Europa" (Comisión Europea, 2014: 9) ratifica

la integración en este concepto de «una amplia gama de diferentes elementos medioambientales que pueden operar a distintos niveles, desde pequeños conectores lineales (…) hasta ecosistemas funcionales completos, tales como bosques de llanuras inundables, humedales o ríos que fluyen libremente» (Fig. 1).



Figura 1. Elementos de la Infraestructura Verde. Fuente: "Construir una Infraestructura Verde para Europa". Fuente: Comisión Europea (2014: 8).

En el marco institucional español cabe destacar, de nuevo, la AUE/2019 que plantea la necesidad de incorporar a la planificación urbanística y territorial la noción de infraestructuras verdes urbanas y azules, como «soluciones multifuncionales basadas en la naturaleza, que resuelven problemas urbanos que van más allá de la mejora de la biodiversidad, como son: el tratamiento de zonas inundables, la reducción de islas de calor, la lucha contra el cambio climático, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el ocio y disfrute ciudadano en dichos espacios» (objetivo 3.1).

Entre los instrumentos de planificación territorial formulados en las diferentes Comunidades Autónomas españolas merece una especial significación, sin duda, la Estrategia Territorial de la Comunidad Valenciana (ETCV, 2011) que destina el Título III de su cuerpo normativo a regular, específicamente, la Infraestructura Verde calificándola como un recurso proyectual imprescindible para lograr un diseño eficiente del territorio. Según establece su Directriz 37, ésta ha de quedar conformada por «los espacios con valores ambientales, paisajísticos y patrimoniales, así como las conexiones que resulten necesarias para mantener los procesos básicos ecológicos del territorio, a fin de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y orientar los futuros desarrollos urbanos y territoriales». Es decir, para la ETCV, la consideración de la Infraestructura Verde en los procesos de planificación territorial y urbanística implica adoptar una innovación metodológica trascendental que impacta en la ideación de los modelos urbano-territoriales a establecer, al invertir la hoja de ruta tradicional que suele emplearse en la conceptuación de la extensión de la ciudad. Anticipando su identificación, el crecimiento urbano resultante se orienta hacia los suelos de menor valor ambiental, paisajístico, cultural y productivo, adecuándolo a la capacidad de acogida del territorio. Esta contundente apuesta metodológica ha sido trasladada a la legislación vigente en la región valenciana.

Así, en el artículo 4.4 de la Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje (LOTUP/2014) -modificada el 21 de febrero de 2019- se regula que «la planificación urbanística y territorial definirá y caracterizará la Infraestructura Verde con carácter previo a la ordenación de usos y actividades en el territorio».

La Infraestructura Verde se extenderá también a los suelos urbanos y urbanizables, comprendiendo, como mínimo, los espacios libres y las zonas verdes públicas más relevantes, así como los itinerarios que permitan su vertebración. A tal efecto, la Carta para la Planificación Ecosistémica de Ciudades y Metrópolis (CPECM. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2018), en su Principio 8 "Verde versus Asfalto", apremia a proyectar en el medio urbano «un mosaico verde interconectado conformado por parques, espacios intersticiales, interiores de manzana, cubiertas verdes y calles liberadas del tráfico: una red verde que se infiltra entre las diferentes matrices de la ciudad con un entramado de itinerarios peatonales de enlace». Al tiempo, reclama prestar una especial atención a las zonas de interfase urbano-rural promoviendo su permeabilidad para evitar la destrucción innecesaria de biodiversidad. Las ganancias que aportan las Infraestructuras Verdes en el medio urbano resultan especialmente importantes por su contribución a la salud y al bienestar de la ciudadanía. Entre éstas destacan «la mejora de la calidad del aire, la atemperación del clima urbano y consiguiente disminución del efecto "isla de calor urbana", la reducción de la contaminación atmosférica o la función social y convivencial desempeñada por los espacios verdes urbanos; todos ellos aspectos relacionados con el nivel general de habitabilidad de las ciudades» (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Centro de Estudios Ambientales, 2014: 3).

De la reflexión expuesta en los párrafos precedentes, cabe colegir que la multifuncionalidad ingénita a la Infraestructura Verde la convierte en «un instrumento de carácter transversal que puede apoyar el desarrollo de numerosas políticas, tanto territoriales como sectoriales (agricultura, energía, cambio climático, biodiversidad, urbanismo, vivienda, espacio público, etc.)» (Ibid.:6). A efectos de ordenación estructural-urbanística, en consonancia con lo regulado en el artículo 4.5 de la LOTUP/2014, pueden significarse las siguientes funciones: (a) preservar los principales sistemas y elementos del patrimonio natural y de la red de espacios públicos, (b) asegurar la conectividad ecológica necesaria para mejorar la biodiversidad de los ecosistemas y la calidad del paisaje, (c) favorecer la continuidad territorial y visual de los espacios abiertos, (d) evitar los procesos de implantación urbana en los suelos con valores naturales o con riesgos naturales e inducidos, de carácter significativo, y (e) vertebrar los espacios de mayor valor ambiental, paisajístico y cultural del territorio con los espacios públicos y los hitos conformadores de la imagen e identidad urbana, mediante itinerarios relacionales.

Entre estos cometidos hay que acentuar, sin duda, el aseguramiento de la conectividad urbano-rural por su incidencia para conformar «una matriz ecológica resultado de la superposición de las matrices ambientales promovidas a partir de la ecología, de los sistemas de parques que se definen a partir del paisajismo y de las estructuras de espacios cívicos que se construyen a partir del urbanismo tradicional. Puede tratarse de un sistema que debe tener simultáneamente valores ambientales y sociales y que debe ayudarnos a resolver la correcta relación entre los tejidos urbanos y los espacios abiertos; una estrategia que debe desarrollarse a todas las escalas: desde la metropolitana hasta la de cada ciudad, desde la de cada barrio hasta la de cada individuo» (Batlle, 2014:7).

La prevalencia conferida a su función conectiva provoca que, entre los diferentes elementos integrantes de la Infraestructura Verde, adquieran una especial relevancia los corredores ecológicos asociados a la red hidrográfica y sus llanuras de inundación evitando, con ello, perseverar en la colonización urbana de suelos que forman parte del régimen de funcionamiento natural de los ríos, dinámica especialmente preocupante en las cuencas de clima mediterráneo. La artificialización de llanuras aluviales acaecida a lo largo de la historia, ha obligado a ejecutar obras de regulación para solucionar el problema causado por los riesgos de inundación anexados a tal circunstancia. El caso de Sevilla, resulta paradigmático de la desfiguración causada en los cauces fluviales por dichas acciones (Fig. 2). En esta ciudad, desde el siglo XIX, se suceden intervenciones hidráulicas que tratan de mitigar las deficitarias condiciones navegables del río Guadalquivir ocasionadas por su insuficiente calado. Al tiempo, se han acometido diversos proyectos de defensa contra las

inundaciones (cortas, aterramientos, muros de defensa, etc.). Todo ello, «junto a la instalación de la red ferroviaria -hoy desmantelada- a lo largo de la margen izquierda, tangente al casco histórico, alteró totalmente la relación de la ciudad con el Guadalquivir, produciéndose un alejamiento cada vez mayor entre ambos» (Monclús, 2002: 19). Esta estrategia de actuación resulta tremendamente paradójica, dado el incuestionable valor simbólico y representativo que el río ha ejercido en la construcción de la memoria colectiva de la ciudadanía sevillana, por lo que cabe deducir la existencia de un vínculo bipolar -que podría sintetizarse en la expresión “me gusta todo de ti, pero tú no”- entre Sevilla y el Guadalquivir.



Figura 2. Obras de regulación en el río Guadalquivir a su paso por Sevilla. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%A1rsena_del_Guadalquivir, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52776679.

El caso de estudio seleccionado para contrastar las reflexiones efectuadas en este texto, el Nuevo Plan General de Palma, ha tenido que asumir una herencia urbano-territorial en la que también pueden apreciarse acciones expresivas de esta forma de proceder, tales como la construcción de motas y diques para mejorar el aprovechamiento del suelo -liberándolo de la hipoteca causada por su condición inundable original- o la rectificación de tramos urbanos de determinados torrentes (Sant Maguí, Sa Riera, Na Bárbara), mediante encauzamientos de hormigón que han incrementado el nivel de las crecidas aguas abajo. Debido a estas actuaciones, la red fluvial de torrentes y escorrentías de Palma ha visto mermada sus condiciones naturales en el contacto con la ciudad.



Figura 3. Red de torrentes de Palma. Documento Inicial Estratégico del Nuevo Plan General de Palma. Fuente: Territorio y Ciudad SLP y CERCLE.

Afortunadamente, frente a esta actitud en cierto modo displicente con los cauces fluviales y sus espacios funcionalmente asociados, en la actualidad se constata una mayor conciencia sobre la necesidad de incorporar el riesgo de inundación en los diferentes ámbitos de la planificación (hidrológica, urbanística, territorial, protección civil, infraestructuras, etc.)[4] con la finalidad de restar agresividad medioambiental a las nuevas soluciones a prever, al asumir que «las áreas fluviales siempre están compuestas por la unión entre dos ámbitos, el acuático y el terrestre, y es precisamente esta interrelación lo que las convierte en ecosistemas singulares» (Ureña, 2002: 46). De ahí que su ordenación deba atender, insoslayablemente, a este nexo relacional indisoluble[5].

Las decisiones adoptadas en el Nuevo Plan General de Palma se adscriben inequívocamente a este posicionamiento disciplinar garante de una planificación sensibilizada con la preservación de las características hidrológicas del territorio[6], adoptando una visión integradora que tiene en cuenta no

[4] A este respecto, el Preámbulo del Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, afirma que el enfoque tradicional para luchar contra los efectos de las inundaciones ha consistido en plantear y ejecutar soluciones estructurales, como la construcción de presas, encauzamientos y diques de protección. Esta estrategia se ha revelado en determinados casos insuficiente, por lo que ha sido complementada, en las últimas décadas, con actuaciones no estructurales, entre las que destaca la adopción de medidas de ordenación del territorio destinadas a atenuar las posibles consecuencias de las inundaciones. Este tipo de actuaciones son menos costosas económicamente y a la vez menos agresivas medioambientalmente.

[5] El caso de Sevilla también resulta representativo de este cambio de rumbo. En su Plan General vigente, aprobado en 2006, se promueve la preservación de la Dehesa de Tablada, llanura aluvial del río Guadalquivir que aún mantiene su condición de inundable y sobre la que, desde los años 90, existió una importante presión, ejercida por el sector inmobiliario-financiero, al objeto de que se constituyese en el principal ensanche residencial de la ciudad.

[6] No obstante, estas actuaciones de "conciliación ambiental" han tenido que ser complementadas con otras destinadas a corregir el ciclo hídrico existente, condicionado por las obras de regulación -apuntadas con anterioridad- acometidas en el pasado y la existencia de un sistema de saneamiento unitario. Entre estas acciones complementarias, destaca la necesidad de implantar "depósitos de tormenta" para retener las aguas de los principales colectores unitarios que no pueden ser depuradas durante los episodios de intensa lluvia al superar su capacidad máxima, evitando inundaciones en la ciudad y vertidos contaminantes en la Bahía de Palma que pueden afectar tanto a las zonas de baños como al hábitat de la pradera de posidonia. Se disponen en las cuencas bajas e intermedias de dichos colectores y junto a las dos depuradoras

sólo los aspectos hidráulicos sino los morfológicos y paisajísticos, potenciando el papel de la red hidrográfica en la vertebración urbana y suburbana (Monclús, 2002.: 22). Se trata, en definitiva, de reconocer que «las formas de los elementos naturales pueden contribuir tanto o más decisivamente que las formas de la edificación y de la urbanización, a conferir orden y hacer inteligibles los nuevos territorios urbanos» (Quero, 2003: 451). De esta manera, se ayuda decisivamente a revertir la concepción residual que ha tenido el sistema ambiental en la historia de la planificación urbanística de nuestras ciudades, dotándolo de un rol destacado en la definición estructural del modelo urbano-territorial. Actuando bajo estos principios se estará en condiciones de adoptar una estrategia de ordenación donde sea plausible comprobar que la ciudad cambia, se transforma y renueva, mientras la esencia del territorio permanece. Esta, en definitiva, es una de las claves que subyacen en la definición de la Infraestructura Verde: identificar las permanencias territoriales que conforman la raíz etimológica del sitio, para que la transformación de la ciudad se produzca de manera dialogante con ellas.

El proyecto de Infraestructura Verde previsto en el Nuevo Plan General de Palma, contempla una matriz ambiental-ecológica que trata de vertebrar las Sierras de Tramuntana y Na Burguesa con el litoral (Fig. 4). La ciudad se encuentra emplazada, precisamente, en el territorio de intermediación entre ambos ecosistemas. Hacia el norte, está abrigada por una orla eco-paisajística -conformada por estas sierras prelitorales de incontestable valor natural, forestal y paisajístico- que se extiende de este a oeste configurando un marco escenográfico de gran significación. Por otro lado, su límite meridional aparece perfilado por la zona costera donde -atendiendo a la caracterización del Atlas y Manual de los Hábitats Naturales y Seminaturales de España- se observan: (a) áreas cuyo principal servicio ecosistémico es el de actuar de soporte de comunidades vegetales y faunísticas (el Área Natural de Especial Interés (ANEI) y Parque Litoral de Es Carnatge, y los humedales de Ses Fontanelles y Es Pilari) y, sobre todo, (b) la pradera de posidonia que se extiende por la Bahía, considerada hábitat prioritario por la función que desarrolla para mantener la buena calidad y transparencia del agua jugando, además, un papel clave en la lucha contra el cambio climático al retener gran cantidad de carbono en sus arrecifes y proteger la costa de la subida del nivel del mar (Comisión Europea, 2014: 12).



Figura 4. El sistema ambiental de Palma. Documento Inicial Estratégico del Nuevo Plan General de Palma. Anexo “Infraestructura Verde”. Fuente: Territorio y Ciudad SLP y CERCLE.

existentes.

Para asegurar la conectividad entre ambos ecosistemas adquiere un carácter protagónico la red de grandes corredores verdes vinculados a los torrentes -pertenecientes a la cuenca central- Sant Maguí, Sa Riera, Na Bárbara y Gros y sus llanuras de inundación, que se ensamblan a la ciudad a través de parques lineales e itinerarios cívicos. Entre ellos, sin lugar a dudas, el Corredor Verde del torrente Gros exhibe una importancia capital en la definición del nuevo modelo territorial (Fig. 5). Se trata de un cauce confinado y degradado con importantes problemas de inundabilidad, de ahí que el Plan Territorial Insular de Mallorca (PTIM, 2004) entendiese imprescindible el desarrollo de acciones que garantizasen su integración paisajística y mitigasen los riesgos de avenidas. El Nuevo Plan General de Palma, para dar eficaz cumplimiento a esta directriz de ordenación, propone la implementación de "soluciones basadas en la naturaleza" como parques de laminación en bordes urbanos y balsas de retención próximas a la desembocadura, a lo que hay que añadir la adopción de SUDS en las zonas urbanas más vulnerables a la potencial inundación a causar por este cauce (Fig. 6). Sobre esta cuestión profundizaremos en el subapartado siguiente.



Figura 5. Imagen del proyecto urbano-territorial planteado en el entorno del Torrente Gros. Documento Borrador del Plan General de Palma: Fuente: Territorio y Ciudad SLP.



Figura 6. Ensayo de "soluciones basadas en la naturaleza" en la desembocadura del Torrent Gros. Documento Inicial Estratégico del Nuevo Plan General de Palma. Anexo "Infraestructura Verde". Fuente: Territorio y Ciudad SLP y CERCLE.

La instrumentación urbanística diseñada para el reconocimiento de esta red de corredores verdes gravita entre su calificación como Sistemas Generales de Espacios Libres -bien incluidos y/o adscritos a sectores de suelo urbanizable, bien localizados en suelo rústico- y su clasificación como suelo rústico protegido. El criterio general adoptado se ha sustentado en las siguientes decisiones: (a) clasificar como suelo rústico protegido los suelos del dominio público hidráulico y las zonas de flujo preferente[7], (b) calificar como Sistema General de Espacios Libres las zonas inundables excluidas del flujo preferente e incluidas en sectores de suelo urbanizable, (c) integrar en áreas de reparto del suelo urbanizable como Sistema General adscrito, la superficie de suelo inundable que pueda ser obtenida gratuitamente para la Administración mediante una gestión eficiente, prudente y proporcional de los excesos de aprovechamiento, y (d) clasificar como suelo rústico protegido el resto de áreas inundables, calificando como Sistema General de Espacios Libres en esta clase de suelo -a obtener, por tanto, por vía expropiatoria- aquellos ámbitos que se han considerado imprescindibles para garantizar la conectividad ecológica de la red ambiental proyectada. Por último, significar el reconocimiento, como suelo rústico protegido, de las rutas del sistema de riego tradicional de Palma, heredado de época medieval (Ruta de la Síquia de la Font de la Vila; la Ruta de la Font d'en Baster y Ruta de la Font de Mestre Pere i Síquia de Na Cerdana). Estas decisiones han coadyuvado, de manera determinante, a incrementar la red de espacios libres y zonas verdes públicas -destacando la elocuente presencia de los nuevos parques fluviales anexos a los torrentes- en, aproximadamente, 200 ha y ampliar la protección del suelo rústico en 212,31 ha.

De la caracterización expuesta cabe concluir que, ante el actual contexto de crisis climática, las zonas litorales y la red de cursos fluviales del municipio de Palma son los pilares que sustentan la Infraestructura Verde definida en el Documento Borrador del Plan General (Fig. 7). Su correcta ordenación, gestión y diseño potenciará el aprovisionamiento de importantes servicios de regulación frente a eventos extremos de lluvia o de temporal marítimo, coadyuvando a apaciguar el efecto de las avenidas y reducir la demanda de recursos hídricos para dar satisfacción a las necesidades (urbano-residenciales, productivas, agrícolas, energéticas, etc.) estimadas a medio-largo plazo[8].

Finalmente, destacar un aspecto importante devenido de la definición de la Infraestructura Verde: su trascendental contribución a reducir la sobreclasificación de suelo urbanizable y aminorar la tentación de seguir artificializando indiscriminadamente el suelo rural, aspecto esencial para facultar la implantación de medidas eco-integradoras favorecedoras de la sostenibilidad del ciclo urbano del agua. Este criterio de ordenación se constituye, además, en un inexcusable ejercicio de ética territorial si se quiere evitar la propagación de la patológica dilución urbana que ocasionaría el desarrollo de este crecimiento expectante, ante la nada desdeñable posibilidad de que comience a despertar del letargo en el que se ha encontrado sumido durante la depresión económica posburbuja.

[7] De esta regla general se han excepcionado las zonas de flujo preferente incluidas en sectores que se encontraban clasificados como suelo urbanizable en el Plan General del año 98. En ellos, mediante la promoción de una nueva ordenación inspirada en criterios de ecología urbana, estos suelos han quedado integrados en el Sistema General de Espacios Libres con lo que su funcionalidad no queda comprometida.

[8] La Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares cuenta con un Plan de Gestión de los Riesgos de Inundación aprobado mediante Real Decreto 159/2016, de 15 de abril. Según se afirma en el Documento Inicial Estratégico del Nuevo Plan General de Palma (página201), la Infraestructura Verde propuesta garantiza la compatibilidad del modelo territorial propuesto con las medidas establecidas en este plan sectorial.



Figura 7. Proyecto de Infraestructura Verde para Palma. Documento Borrador del Plan General de Palma. Fuente: Territorio y Ciudad SLP.

En el caso del Nuevo Plan General de Palma el crecimiento urbano propuesto (Fig. 8) asciende a la cifra de 320,54 ha, apenas un 6,22% de la superficie del suelo urbano (5.153,22 ha). Esta cantidad es significativamente inferior a la oferta pendiente de ejecución del Plan General vigente: 494 ha, cifra que representa el 45% de las 1.093,55 ha totales que se clasificaron como suelo urbanizable. Es decir, transcurridos más de 20 años desde su aprobación definitiva en 1998, aún resta por desarrollar prácticamente la mitad del suelo urbanizable previsto. Este dato denota el sobredimensionamiento de la superficie destinada a extender la ciudad, contemplada en dicho instrumento. El importante decrecimiento propuesto en el Nuevo Plan General se sustenta en la desclasificación de 186,65 ha, frente a unas exiguas 38,21 ha de nuevas clasificaciones de suelo rústico. Es decir, por cada m2 de suelo rústico que se propone clasificar como nuevo suelo urbanizable, se desclasifican -restituyendo a su condición rural original- 4,8 m2. Esta suerte de "urbanismo de marcha atrás" ha operado en suelos que atentan claramente contra los principios axiomáticos que han de guiar un crecimiento urbano sostenible, bien por fomentar la dispersión territorial con bajas densidades residenciales, bien por afectar a determinaciones de la legislación sectorial o, también, por presentar valores naturales y condiciones topográficas -pendientes excesivas- que sugieren su preservación[9].

[9] Entre los suelos desclasificados destaca el ámbito del humedal de Ses Fontanelles, el mayor de Palma y hábitat del endemismo "limonium barceloi", que fue clasificado como suelo urbanizable por el Plan General de 1998.



Figura 8. Crecimiento urbano propuesto en el Documento Borrador del Plan General de Palma. Fuente: Territorio y Ciudad SLP.

2.2. Una ordenación del medio urbano sensible al agua: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible e incremento del "índice biótico del suelo"

La definición de una Infraestructura Verde que, además de salvaguardar la red hidrográfica y sus llanuras de inundación, posibilite instrumentar medidas de atemperación, mesura y proporcionalidad en los nuevos crecimientos a impulsar por el planeamiento general, siendo condición necesaria -imprescindible, más bien- no es suficiente para garantizar un ciclo urbano del agua dotado de las necesarias dosis de sostenibilidad. Para alcanzar unos niveles óptimos deseables habrá que implementar, sin duda, acciones dirigidas a promover el ahorro de agua, explorar recursos alternativos para satisfacer usos poco exigentes (reciclaje de aguas grises, captación de pluviales en la edificación, etc.), implantar redes separativas en nuevos desarrollos urbanos (artículo 259 ter del Reglamento del Dominio Público Hidráulico en vigor) o incorporar energías renovables para cubrir determinadas necesidades (tratamientos, bombeos, agua caliente sanitaria, etc.). Pero, sobre todo, se debe estimular la adopción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), ante la evidencia de que «la impermeabilización creciente de las superficies urbanas ha generado una modificación de la capacidad natural del suelo para retener e infiltrar las aguas y, como consecuencia, un aumento importante de los flujos de escorrentía incrementando el número y gravedad de las inundaciones y la sobrecarga de las redes unitarias, convirtiéndolas en fuente de contaminación difusa» (Lara, 2018: 69).

La asociación CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) define los SUDS como «aquellos sistemas de drenaje que contribuyen al desarrollo sostenible y a la mejora del diseño urbano, equilibrando los diferentes intereses que influyen en el desarrollo de la comunidad. Enfocan la gestión del agua superficial considerando la cantidad de agua (inundaciones), la calidad (contaminación) y el uso público que se le puede dar»[10]. Estas técnicas forman parte de nuevas estrategias empleadas para mejorar el funcionamiento de las ciudades, al actuar como retardadores y laminadores de la escorrentía, atenuando la saturación de colectores, reduciendo los vertidos de aguas

[10] https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/drenaje-urbano-sostenible (Consulta: 9/07/2020).

residuales en cauces públicos y aminorando los efectos negativos sobre los medios receptores y sus efectos sobre los ecosistemas[11].

Su implantación se anuda al establecimiento de criterios y directrices de ordenación urbana que reduzcan los niveles de impermeabilización existentes en la ciudad y eviten su reproducción en los nuevos espacios urbanos resultantes del desarrollo de las actuaciones de transformación urbanísticas ideadas por el planeamiento general. Entre las posibles medidas a contemplar para el desarrollo de una "ordenación urbana sensible al agua" aplacadora de esta problemática vamos a profundizar en tres de especial significación: (a) reducir la cautividad a la que el tráfico motorizado tiene sometido a la actual red de calles, principal causa de su impermeabilización, mediante la instrumentación de una política urbana orientada a garantizar una movilidad eficiente y sostenible, (b) explorar las capacidades de transformación cualitativa que ofrece el suelo urbanizado no edificado de la periferia inconclusa causada por la deflagración de la última burbuja inmobiliaria, promoviendo su desurbanización parcial, y (c) adoptar nuevos criterios de ordenación en el proyecto de actuaciones de transformación urbanística de nueva urbanización que incrementen la permeabilidad del espacio urbano resultante.

a. La sostenibilidad en materia de movilidad, requiere potenciar y mejorar el transporte colectivo y los modos no motorizados, junto a una adecuada localización de las actividades urbanas sin lo cual, la efectividad de las medidas a desplegar quedaría minimizada. La finalidad básica de este objetivo es alterar el modelo de ciudad dominante pensado para «un ciudadano tipo que utiliza la ciudad en su totalidad, que puede consumir servicios sofisticados ofertados en puntos diversos y distantes de su vivienda» (Hernández-Aja, 2000: 91-92). A tal efecto, la AUE/2019 promueve, entre sus objetivos específicos, potenciar los modos de transporte sostenibles (objetivo 5.2) y favorecer la ciudad de proximidad (objetivo 5.1), para reducir los desplazamientos cotidianos de largo recorrido en el interior de la ciudad.

Esta estrategia operacional permitirá reinventar el espacio de la calle al liberar de la tiranía del tráfico motorizado un importante porcentaje de la red existente. El objetivo es limitar el tráfico de paso a determinados elementos viarios, adoptando una nueva célula organizativa de la movilidad –la denominada "supermanzana"– que actúe como argumento catalizador de un espacio público multifuncional, cívico y ciudadano. Las supermanzanas son espacios en los que el tráfico interior se restringe al demandado por el residente por lo que, además de disminuir sustantivamente la intensidad de los flujos, la velocidad del desplazamiento motorizado se acomoda a la del peatón. Su adopción coadyuvará a disponer más del 70% del espacio de las calles para uso no motorizado, preferentemente peatonal, y facultará, complementariamente, la incorporación de mejoras en los parámetros de urbanización del espacio público que inviertan sus actuales tasas de impermeabilización (Fig.9).

[11] En base a su funcionalidad los SDUS se clasifican en: (a) sistemas de "detención y retención", que almacenan las aguas de las primeras lluvias, reduciendo los caudales punta de las avenidas y los volúmenes de escorrentía, ralentizando su velocidad para aumentar el tiempo de filtración, (b) sistemas de "retención y tratamiento de la calidad del agua", que acopian las aguas de lluvias, incorporando procesos de sedimentación, absorción y biodegradación que mejoran la calidad del agua, (c) sistemas de "infiltración" de las aguas pluviales a través de capas granulares filtrantes, aumentando la permeabilización al tiempo que consiguen mejorar la calidad del agua infiltrada, y (d) sistemas de "recarga directa" mediante pozos que moderan las escorrentías adecuándolas a los niveles geotécnicos del aluvial.

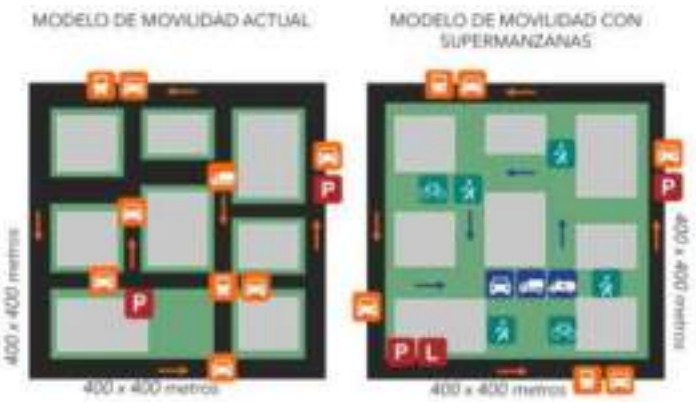


Figura 9. Esquema de Supermanzana. Fuente: Certificación del Urbanismo Ecosistémico (Gobierno de España, 2017: 152).

Según datos proporcionados por el Sistema de Información de la Ocupación del Suelo en España (SIOSE) relativos al año 2014, la superficie de la categoría urbana "vial, aparcamiento y zona peatonal sin vegetación" asciende, en la ciudad de Palma, a 1.401,06 ha (el 27,20% de la superficie total del suelo urbano). Ello significa que con la implantación de supermanzanas se podrían recuperar para el ciudadano hasta 980,74 ha de la actual red de calles que, de esta forma, pasaría a constituirse el principal espacio público convivencial de la ciudad (Fig. 10).

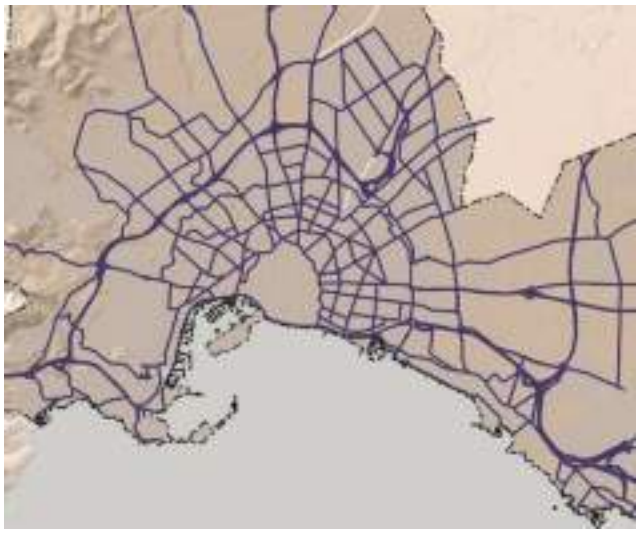


Figura 10. Estudio para la definición de supermanzanas en la ciudad de Palma. Fuente: Territorio y Ciudad SLP.

El modelo de supermanzanas representa, por tanto, una táctica innovadora, trasversal e integradora de ordenación urbana que tiene por objeto recuperar el espacio público para las personas, reducir el transporte motorizado, promover los estilos de vida activos, lograr que las ciudades sean más ecológicas y mitigar los efectos del cambio climático. De esta forma muchos tejidos urbanos podrán alcanzar las ratios de verde por habitante recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (10 m2 de suelo/ habitante), favoreciendo la implantación de SUDS para incrementar significativamente la superficie permeable (Fig. 11), con la finalidad de contribuir al buen funcionamiento del sistema hídrico reduciendo, con ello, los riesgos de inundación (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2018: 101).



Figura 11. Acondicionamiento de calle con SUDS. Museumlaan, Enschede (Holanda). Buro Sant & Co. Fuente: Revista Paisea nº 21.

b. Una de las manifestaciones paradigmáticas del legado transferido por la última burbuja inmobiliaria desarrollada en España ha sido una suerte de "periferia nonata" constituida por el suelo urbanizado no edificado causado por su deflagración instantánea. La necesidad de intervenir en este epifenómeno del "tsunami urbanizador" (Fernández, 2006) de la década prodigiosa del urbanismo español (1997-2007) se sustenta en la inadecuación de los criterios de ordenación que han guiado su ejecución urbanística a causa, principalmente, de: (a) unos parámetros manifiestamente mejorables en materia de densidad residencial y mezcla de usos, y (b) la adopción de un modelo de urbanización incentivador de una excesiva impermeabilización. Es decir, este paisaje urbanizado presenta patologías, deficiencias y disfuncionalidades que convendría revertir. Sin embargo, el establecimiento de estrategias de ordenación con la finalidad de, al menos, amortiguar esta situación precisa atender a los preceptos legales que obligan a que toda intervención en el "suelo urbano con la urbanización consolidada", si no se quiere acudir a la expropiación por parte de la Administración, implica plantear incrementos de aprovechamientos compensatorios de las nuevas cargas urbanísticas a asumir por unos propietarios que, no se olvide, cuentan con sus derechos de aprovechamiento correctamente patrimonializados.

Esta estrategia de reordenación consiste, sintéticamente, en detraer el aprovechamiento lucrativo de determinados suelos para transferirlo a otros. Su expresión instrumental, en el marco legislativo actual, son las «actuaciones de dotación» del suelo urbano[12], que permiten incrementar el aprovechamiento de una parcela/s a costa de transferir el otorgado en otra/s, que quedaría recalificada para usos públicos al objeto de ampliar la oferta dotacional existente en proporción al incremento propuesto. La regeneración urbana inducida por esta técnica urbanística es idónea para, entre otras finalidades, incrementar los índices de permeabilidad del suelo reduciendo la artificialización subyacente al binomio urbanización-edificación al promover la desurbanización de parcelas que hayan quedado desprovistas de aprovechamiento edificatorio integrándolas en la infraestructura verde pública de la ciudad, recalificadas como espacios libres. Su nuevo destino debería ser experimental e

[12] El artículo 7 1.b) del TRLSRU/2015, regula las actuaciones de dotación, considerando como tales «las que tengan por objeto incrementar las dotaciones públicas de un ámbito de suelo urbanizado para reajustar su proporción con la mayor edificabilidad o densidad o con los nuevos usos asignados en la ordenación urbanística a una o más parcelas del ámbito y no requieran la reforma o renovación de la urbanización de éste».

innovador, apostando por desplegar nuevas actividades vinculadas con las funciones ambientales del espacio abierto y con la agricultura urbana como opción que integra productividad del suelo con ocio activo de la población (Gaja, 2013: 313-353).

Para visualizar las capacidades que ofrece la intervención -en claves de "sensibilización en materia de agua"- en este espacio urbano periférico inacabado (Fig. 12), significar que en un estudio reciente sobre el urbanismo ejercitado en el litoral andaluz (Górgolas, 2020), se estima que en este dominio territorial existen un total de 8.000 ha de suelo urbanizado, adormecido y desactivado. En concreto, en la unidad subregional de la Costa del Sol Occidental, el volumen de suelo en esta situación inconclusa asciende a 1.330,70 ha, con una densidad neta media inferior a las 30 viviendas/hectárea. Incrementando dicha densidad a 80 viviendas/hectáreas -equivalente a densidades globales cercanas a 40 viviendas/hectárea- sin alterar el número máximo de viviendas establecido, el suelo edificable se reduciría a 500 hectáreas y, en aplicación de la técnica instrumental de las actuaciones de dotación, se podrían desurbanizar un total de 830,70 hectáreas destinadas a mejorar la oferta pública de infraestructura verde de la ciudad, con las beneficiosas consecuencias que se generarían para optimizar el funcionamiento del sistema hídrico (Ibid.: 154).



Figura 12. Núcleo costero de Casares (Málaga). Ensayo proyectual destinado a densificar selectivamente y desurbanizar el suelo urbanizado no edificado. Fuente: dibujo del autor.

c. En el proyecto urbano de las actuaciones de transformación urbanística de nueva urbanización propuestas por el planeamiento general[13], la ordenación del sistema de espacios libres, además de responder a necesidades funcionales cuantificables, debe concebirse atendiendo al importante papel ejercido por la infraestructura verde en la definición morfológica del modelo de ciudad resultante. Para ello, la estrategia de colonización urbana a promover en los nuevos desarrollos urbanísticos deberá conformar un mosaico territorial -concebido desde actitudes no impositivas de lo urbano hacia lo natural- integrado por dos matrices de condición morfológica diferenciada, al objeto de preservar y resaltar las singularidades del soporte territorial (Fig. 13).

[13] Entre estas actuaciones se encuentran: (a) las de compleción de vacíos relevantes existentes en la ciudad consolidada, (b) las orientadas a promover la sustitución de tejidos e instalaciones -habitualmente fabriles y/o dotacionales- obsoletas, y (c) las de nueva urbanización en suelos de crecimiento. Entre estas adquiere un notable interés, para la temática que nos ocupa, la capacidad de promover la reordenación de sectores de suelo urbanizable ordenados en detalle afectados por riesgos de inundación, al objeto de adoptar medidas que favorezcan su evitación o, cuanto menos, su minimización.



Figura 13. Ensayo de proyecto urbano para reordenar el Ensanche Occidental de Palma. El modelo de colonización urbana propuesto reconoce la raíz etimológica del soporte territorial caracterizado por la presencia de una red de vaguadas que se integran en el sistema de espacios libres y zonas verdes propuesta. Fuente: Territorio y Ciudad SLP y MRPR arquitectos SLP.

La afección a las condiciones originales del medio físico que genera cualquier proceso de nueva urbanización debe equilibrarse, por consiguiente, con la adopción de recursos de proyecto urbano que garanticen la conectividad biológica. Se trata, en definitiva, de concebir el verde urbano como una red continua y articulada favorecida por la promoción de un "índice biótico del suelo" que garantice una ratio de permeabilidad razonable. Según se establece en el documento "Certificación del Urbanismo Ecosistémico" -elaborado por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona para el Ministerio de Fomento en 2017-, este indicador expresa la relación entre las superficies funcionalmente significativas en el ciclo natural del suelo y el área total de la actuación urbanística concernida, y su contemplación en proporciones idóneas incide, de manera determinante en: (a*) la habitabilidad del espacio público*, toda vez que las superficies vegetadas son captadoras potenciales de partículas contaminantes y ayudan a propiciar confort térmico, amortiguando el efecto de isla de calor, (b) *el reequilibrio del ciclo del agua* al favorecer la infiltración de las aguas pluviales y retener el agua de lluvia reduciendo, con ello, el riesgo de inundaciones, (c) *la adaptación y mitigación al cambio climático* dado que las superficies con cobertura vegetal ayudan a reducir las emisiones de CO2. Este documento institucional promueve para el "índice biótico del suelo" un valor deseable cifrado en el 30% de la superficie total a ordenar en cada actuación de transformación urbanística de nueva urbanización.

3. UN APÉNDICE FINAL: LA PROBLEMÁTICA CAUSADA POR LOS ASENTAMIENTOS IRREGULARES EN SUELO RÚSTICO AFECTADO POR RIESGOS DE INUNDACIÓN. APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ANDALUCÍA

> *En Andalucía, el fenómeno de la edificación en el medio rural, aunque aflora tiempo atrás, acusó una importante potenciación en las décadas interseculares. La avidez de la maquinaria de producción de viviendas vinculada al frenesí inmobiliario característico de dicho periodo no se conformó con su expresión reglada a través de desarrollos urbanísticos ortodoxos, sino que tuvo su correlato en la aceleración del proceso de invasión edificatoria fraudulenta del suelo rural. Entre las causas explicativas de este fenómeno destacan, principalmente, la nula*

> *conciencia social sobre los preocupantes efectos –ambientales, territoriales, sociales y económicos– causados por estas infracciones y la escasa diligencia mostrada por la Administración en el imprescindible ejercicio de la función de control y disciplina que le atañe, demostrando, con ello, escasa capacidad para proceder a su contención y erradicación revelando, al tiempo, cierta condescendencia con el mismo* (Górgolas, 2019: 191).

De acuerdo con las hipótesis efectuadas en el trabajo de investigación "el Urbanismo de la No Ciudad: de la clandestinidad vulnerable a la visibilidad sostenible" -elaborado por un equipo mixto conformado por investigadores de la Universidad de Sevilla y un conjunto de empresas colaboradoras-14 la estimación de la superficie afectada por ocupaciones irregulares de uso residencial y mixto en el suelo no urbanizable de Andalucía ascendería a un total de 47.213 ha., distribuidas en un número aproximado de 2.870 enclaves. Al tiempo, la superficie de suelo clasificado -como urbano o urbanizable- en el planeamiento vigente en el conjunto de municipios andaluces, que pudiera estar afectado por la incorporación de parcelaciones urbanísticas clandestinas, se sitúa en torno a las 42.021 ha. En conjunto, la superficie total de ocupaciones irregulares en esta región podría alcanzar unas 89.234 ha (Piñero, 2020: 75).

Por su parte, el Preámbulo del Decreto-Ley 3/2019, de 24 de septiembre, de medidas urgentes para la adecuación ambiental y territorial de las edificaciones irregulares en la Comunidad Autónoma de Andalucía, informa de la existencia de 500.000 edificaciones en suelo no urbanizable de las que unas 300.000 son irregulares, habiendo accedido sólo un 26% a los suministros básicos en condiciones mínimas de seguridad y salubridad. Estas cifras denotan la intensidad del conflicto causado en Andalucía por el afloramiento de asentamientos irregulares en el suelo no urbanizable, de lo que puede concluirse que, hoy día, esta patología territorial constituye la mayor hipoteca para lograr una ordenación urbano-territorial racional, coherente y sensata en esta Comunidad Autónoma.

Según establece el artículo 20 de este Decreto-Ley, el Plan General de Ordenación Urbanística es el instrumento responsable de identificar, delimitar e incorporar aquellas agrupaciones de edificaciones irregulares que se estimen compatibles con el modelo territorial y urbanístico adoptado. En todo caso, el ejercicio de esta potestad no es generalizable a todas las situaciones existentes, al encontrarse impedido en determinadas circunstancias, entre las que destaca -para la temática que nos ocupa- que estos enclaves clandestinos hayan aflorado en suelos con riesgos ciertos de inundación acreditados por el órgano sectorial oportuno[15] (Fig. 14). No obstante, este veto puede desaparecer cuando la administración competente haya adoptado o admita el establecimiento de medidas que eviten o minimicen estos riesgos, en cuyo caso se abren dos opciones instrumentales para la regularización de estos enclaves: (a) que el Plan General promueva su integración urbanística otorgando la clasificación del suelo -urbano o urbanizable- que considere oportuna, o (b) formular un Plan Especial en suelo no urbanizable para la adecuación ambiental y territorial de estas agrupaciones (Título II del Decreto-Ley 3/2019), sin necesidad de su previsión en el Plan General y/o planificación territorial. En todo caso, hay que advertir que el acometimiento de una ordenación integral en esta "periferia fraudulenta" suele generar innumerables problemas de gestión provocados,

[14] El Proyecto I+D+i "El Urbanismo de la No Ciudad: de la clandestinidad vulnerable a la visibilidad sostenible", fue presentado al concurso público convocado por la Agencia de Obra Pública de Andalucía (AOP) y adjudicado mediante procedimiento negociado con publicidad (expediente. G-GI3001/IDIL) el 9 de octubre de 2013 a un equipo mixto compuesto por profesores del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la Universidad de Sevilla y tres empresas colaboradoras. En este Proyecto he tenido una activa participación como responsable de Territorio y Ciudad SLP, principal empresa colaboradora.

[15] El artículo 46 de la vigente Ley 7/2002 de Ordenación Urbanística de Andalucía, regula que los suelos que presenten riesgos ciertos de inundación acreditados en el planeamiento sectorial deberán ser clasificados como "suelo no urbanizable de especial protección por legislación específica". Por su parte, el TRLSRU/2015, en su artículo 21, dispone que "los suelos con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación" estarán en la situación básica de suelo rural.

mayoritariamente, por el rechazo que la población asentada suele manifestar ante la obligación legal de asumir los deberes urbanísticos (de urbanización, de cesión y de equidistribución) vinculados a su reconocimiento y regularización. Esta evidencia ha ocasionado la abrupta paralización de los escasos procedimientos activados para tal finalidad, por lo que la solución a esta problemática constituye, sin duda, una de las cuentas pendientes del urbanismo andaluz.

En el caso de inadmisibilidad de medidas de evitación y/o minimización de riesgos de inundación por parte de la administración competente, en las edificaciones irregulares existentes se deberán aplicar las acciones necesarias para restituir la legalidad infringida, salvo que el plazo para su adopción estuviera agotado a la fecha del establecimiento del régimen de protección especial o la imposición de cualquier otra de las limitaciones devenidas del riesgo constatado. Es decir, si una edificación clandestina localizada en suelo no urbanizable con riesgo de inundación se encuentra terminada, como mínimo, seis años –plazo legal para la prescripción regulado en la legislación urbanística andaluza– antes del momento en el que un plan territorial o un plan general determine la inclusión del suelo sobre el que se implanta en una categoría de especial protección, procederá su reconocimiento mediante una novedosa figura jurídica denominada “asimilado al fuera de ordenación” (AFO).



Figura 14. Enclave clandestino afectado por riesgos de inundación en Chiclana de la Frontera (Cádiz). Fuente: Ayuntamiento de Chiclana de la Frontera.

Este régimen jurídico singular se caracteriza por dos notas fundamentales: «en primer lugar, las edificaciones siguen manteniendo su situación jurídica de ilegalidad y, en consecuencia, su reconocimiento o tolerancia por la Administración lo será sin perjuicio de las responsabilidades en que pudiera haber incurrido su titular. En segundo lugar, el régimen arbitrado para estas edificaciones es similar, aunque con mayores restricciones, al previsto para las edificaciones en situación legal de fuera de ordenación, limitándose las obras autorizables a las exigidas para el estricto mantenimiento de las condiciones de seguridad, habitabilidad y salubridad del inmueble. En lo que respecta a los servicios básicos, se establece que éstos se presten de forma autónoma, sin inducir la formación de un núcleo de población». En cualquier caso, conviene puntualizar que el acometimiento de obras en aquellas edificaciones irregulares que se encuentren ubicadas en las zonas de flujo preferente se encuentra condicionado por la regulación del artículo 9 bis[16] del Reglamento del Dominio Público

[16] El apartado 2 de este artículo admite en la zona de flujo preferente, de manera excepcional, obras destinadas a la conservación y restauración de “construcciones singulares asociadas a usos tradicionales del agua” siempre que mantenga

Hidráulico (RDPH), aprobado por Real Decreto 849/1986 y modificado por el Real Decreto 638/2016. En las excluidas de estas zonas se deberá dar cumplimiento a lo estipulado en el artículo 14 bis.1 del RDPH en función del riesgo de inundación existente, asegurando -para las de uso residencial- que no se vean afectadas por la avenida con periodo de retorno de 500 años.

4. EPÍLOGO: "URBANISMO RESILIENTE", UN ARGUMENTO DE ÉTICA TERRITORIAL

Según Fernando de Terán (2017: 28) estamos viviendo una concepción de la política urbano-territorial caracterizada por su «excesivo entusiasmo por los principios liberales y su dependencia de la dominante política económica». Y la planificación no funciona si falla la política. Por esta razón, «la práctica de la planificación suele devenir frustraciones y desengaños ante la cultura empresarial-inmobiliaria que inspira las directrices políticas que la orientan y el desapego social que la desacredita» (Górgolas, 2020: 194). El relato efectuado en este texto advierte de la perentoria y urgente necesidad de promover un cambio de ciclo en el planeamiento urbanístico vigente con la finalidad de adecuarlo a nuevas estrategias operacionales favorecedoras de un "urbanismo resiliente" que embride con ataduras de ética territorial el discurso economicista que ha dominado el "urbanismo expansivo" ejercitado en el pretérito reciente. Esta actitud regenerativa comporta, de manera prioritaria, reducir las quiméricas expectativas de crecimiento urbano contempladas en el planeamiento general vigente, al objeto de impedir continuar con el sellado indiscriminado del suelo rural y, entre otros criterios de sostenibilidad urbana a aplicar, reducir la impermeabilización del suelo urbanizado.

Así, se favorecerá la configuración de nuevos modelos urbano-territoriales adaptados a la caracterización de la matriz biofísica del territorio, instrumentando medidas que garanticen la prevención de los riesgos de avenidas e inundación y mitiguen los efectos del cambio climático. Para avalar el cumplimiento de estos objetivos, se han significado a lo largo del texto una serie de principios de ordenación eco-integradores: (a) proyectar una Infraestructura Verde del Territorio que reconozca sus "raíces etimológicas" al objeto de impedir la desfiguración a causar por expansiones urbanas displicentes con los valores a proteger, (b) contemplar directrices de ordenación en el medio urbano "sensibles al agua" direccionadas a invertir las tasas de impermeabilización de la actual red de calles, (c) promover la desurbanización selectiva de la "periferia nonata" característica del legado transferido por la última burbuja inmobiliaria, para coadyuvar a muscular la infraestructura verde urbana, (d) observar nuevos criterios de ordenación en los proyectos urbanos de las actuaciones de transformación urbanística al objeto de impulsar modelos de urbanización que incrementen la permeabilidad del suelo; es decir, su "índice biótico". Sin olvidar, claro está, (e) la aportación de soluciones veraces, imaginativas, innovadoras y eficaces a la impostura territorial causada por la "periferia fraudulenta" anexada al afloramiento de asentamientos diseminados en el suelo rústico que, en muchos casos, se encuentra afectado por riesgos de inundación con diferentes niveles de peligrosidad. Su acometimiento deviene insoslayable dada la escala y voluminosidad adquiridas por un fenómeno, en cierto modo, irreversible que hipoteca la ideación de modelos urbano-territoriales sostenibles.

La aplicación de estos axiomas sustentadores del "urbanismo resiliente" reclamado anteriormente, no admite demoras si se quiere llegar a tiempo de poder distinguir en el territorio entre "lo interno, lo externo y lo externalizado" porque, en palabras de Ramón Folch (2010: 105), «la actual ampliación

su uso tradicional y no permitiendo, en ningún caso, un cambio de uso salvo su acondicionamiento museístico. Parece evidente que las edificaciones irregulares afloradas en estos enclaves no se adecúan a la tipificación singular reclamada en el artículo para admitir estas obras. En estas edificaciones, siempre que el plazo para restituir la legalidad haya prescrito, el apartado 4 del artículo 9 bis regula que las administraciones competentes fomentarán la adopción de medidas de disminución de la vulnerabilidad y autoprotección, todo ello de acuerdo con lo establecido en la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil y la normativa de las comunidades autónomas.

de los diferentes internos ha reducido al mínimo lo externo sin transformar, de modo que no queda lugar para la externalización, a menos que no se haga contra un interno vecino. De ahí los codazos y los conflictos. No queda río al que tirar nada, porque el siguiente usuario se encuentra en la mismísima inmediatez. La globalización está logrando que el planeta por entero sea un único territorio, sin lugar para externalizaciones».

REFERENCIAS

- Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (2018). *Carta para la planificación ecosistémica de ciudades.* https://etsav.upc.edu/ca/shared/cat/carta-para-la-planificacion-ecosistemica-de-las-ciudades_con-anexos_junio-2018-1.pdf
- Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2014). *La Infraestructura Verde urbana de Vitoria-Gasteiz. Documento de propuesta.* Vitoria-Gasteiz: Centro de Estudios Ambientales.
- Batlle, E. (2014). La matriz ecológica metropolitana y las distintas escalas de las infraestructuras verdes. *Revista Quaderns PDU Metropolitá*, 3, 6-25.
- Campos Venutti, G. (1981). *Urbanismo y austeridad.* Siglo XXI de España Editores, Madrid.
- Comisión Europea (2007). *Carta de Leipzig sobre Ciudades Europeas Sostenible.* http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0506083.pdf.nitti, G
  -(2010). *Declaración de Toledo. Reunión Informal de Ministros de Desarrollo Urbano.* https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/regeneracion_urbana/es_def/adjunto201006_toledo_declaration_es.pdf
  -(2012). *Directrices sobre mejoras prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado de suelo.* Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo.
  -(2013). *Infraestructura Verde: mejora del capital natural de Europa.* Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones.
  https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0008.03/DOC_1&format=PDF
  -(2014). *Construir una Infraestructura Verde para Europa*. https://doi.org/10.2779/2738
- Consell de Mallorca (2004). Plan Territorial Insular de Mallorca. *Boletín Oficial de las Islas Baleares*, de 31 de diciembre, 188 EXT.
- Ezquiaga, J. M. (2020). La huella de las epidemias en los instrumentos de control urbanístico de las ciudades. *Revista de Derecho Urbanístico y medio ambiente*, 337-338, 157-200.
- Fernández, R. (2006). *El tsunami urbanizador español y mundial: sobre sus causas y repercusiones devastadoras, y la necesidad de prepararse para el previsible estallido de la burbuja inmobiliaria*. Virus Editorial, Barcelona.
- Folch, R. (2003). Los conceptos socioecológicos de partida. Principios ecológicos versus criterios territoriales. En: R. Folch (Coord.), *El Territorio como sistema. Conceptos y herramientas de ordenación,* 19-42, Colección: Territorio y Gobierno, Visiones, Diputación de Barcelona, Barcelona.
  -(2010). De la matriz biofísica al espacio socioambiental: el territorio del siglo XXI. En *Crisis y Territorio. Aportaciones y Conclusiones del VI Congreso Internacional de Ordenación del Territorio,* 105-106. Asociación Interprofesional de Ordenación del Territorio, FUNDICOT, Madrid.
- Generalitat Valenciana (2011). Decreto 1/2011, de 13 de enero, del Consell, por el que se aprueba la Estrategia Territorial de la Comunidad Valenciana. *Diario Oficial de la Comunidad Valenciana,* de 19 de enero, 6441.
- Gobierno de España. (2008). *Análisis de la huella ecológica en España.* Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
  -(2013). *Áreas Urbanas + 50. Información estadística de las Grandes Áreas Urbanas españolas 2012*. Ministerio de Fomento. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, Madrid.

-(2017). *Certificación del Urbanismo Ecosistémico.* Ministerio de Fomento, Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, Madrid.
-(2019). *Agenda Urbana Española 2019.* Ministerio de Fomento, Madrid.
Górgolas, P. (2019). *Dos décadas de Urbanismo en Andalucía (1997-2017). Historia de una contradicción* (Vol. 36). Editorial de la Universidad de Sevilla y Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio, Sevilla.
-(2020). *El urbanismo en el litoral andaluz tras la última burbuja inmobiliaria. Cambio de ciclo o reincidencia.* Tirant Humanidades, Valencia.

- Hernández-Aja, A. (2000). Barrios y equipamientos públicos, esencia del proyecto democrático de la ciudad. *Documentación Social de Cáritas Española*, 119, 79-93.
- Lara, A. (2018). *Agua y espacio habitado. Propuestas para la construcción de ciudades sensibles al agua.* Editorial de la Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Lobato, J. A. (2020). Notas sobre la obsolescencia de los planes generales: planificación estratégica y modelo urbano. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, 204 (LII), 197-210.
- Monclús, J. (2002). Ríos, ciudades, parques fluviales, corredores verdes. En: P. Del Cal y F. Pellicer (Coords.), *Ríos y ciudades: aportaciones para la recuperación de los ríos y riberas de Zaragoza,* 11-32. Instituto Fernando El Católico.
- Nel-Lo, O. (2012). *Ordenar el territorio. La experiencia de Barcelona y Cataluña.* Tirant Humanidades, Valencia.
- Observatorio de la Sostenibilidad en España (2016a). *URB 16. 25 años urbanizando España*. Observatorio de la Sostenibilidad en España, Madrid.
  -(2016 b). *COSTA16. Cambios de ocupación de suelo en la costa*. Observatorio de la Sostenibilidad en España, Madrid.
- Piñero, A. (2020). Enclaves irregulares en el suelo no urbanizable y sostenibilidad: el caso andaluz. En: C. De Tomás (Coord.), *Regeneración y Planeamiento para ciudades sostenibles. Experiencias en América, Marruecos y España,* 58-85. Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Quero, D. (2003). Geografía y urbanización en las ciudades mediterráneas. Málaga como ejemplo. En: H. Capel (Coord.), *Ciudades, Arquitectura y Espacio Urbano,* 447-457. Almería: Mediterráneo Económico, Colección de Estudios socioeconómicos, Instituto Cajamar.
- Rodríguez-Rojas, M. I. (2014). Diseño urbano sensible al agua. Una oportunidad para la integración del agua en el proyecto urbano. En: *Guía Nueva Cultura del Agua*. Fundación Nueva Cultura del Agua. https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/el-agua-en-el-medio-urbano/diseno-urbano-sensible-al-agua
- Rullán, O. (2010). Las políticas territoriales de las Islas Baleares. *Cuadernos Geográficos,* 43, 403-418.
- Terán, F. (2017). *Antes de salir por la puerta del tiempo. Visión personal de un urbanismo real.* Ricardo Sánchez Lampreave, Madrid.
- Ureña, J. M. (2002). La ordenación de los espacios fluviales en las ciudades. En: P. Del Cal y F. Pellicer (Coords.), *Ríos y ciudades: aportaciones para la recuperación de los ríos y riberas de Zaragoza*, 45-63. Instituto Fernando El Católico.

NORMATIVA CITADA

Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos I, IV, V, VI, VII y VIII del texto refundido la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, según establece el artículo único 1 del Real Decreto 9/2008, de 11 de enero (BOE-A-2008-755). (última modificación: 9 de noviembre de 2018). *Boletín Oficial del Estado*, de 30 de abril, 103.

Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. *Boletín Oficial del Estado,* de 15 de julio, 171.
Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje de la Comunidad Valenciana. *Boletín Oficial de Estado,* de 23 de septiembre, 231.
Decreto-Ley 3/2019, de 24 de septiembre, de medidas urgentes para la adecuación ambiental y territorial de edificaciones irregulares en la Comunidad Autónoma de Andalucía. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, de 25 de septiembre, 23.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA DE LOS AZARBES DEL BAJO SEGURA Y EL BAIX VINALOPÓ TRAS LAS INUNDACIONES DE SEPTIEMBRE DE 2019

Gema Marco Dos Santos
gema.marcodos.santos@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4469-584X

Ignacio Meléndez Pastor
imelpas@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2616-3089

María Belén Almendro Candel
mb.almendro@umh.es
https://orcid.org/0000-0003-3704-8078

Jose Navarro Pedreño
jonavar@umh.es
https://orcid.org/ 0000-0002-4765-2191

Ignacio Gómez Lucas
ignacio.gomez@umh.es
https://orcid.org/0000-0002-0931-9654

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente,
Universidad Miguel Hernández de Elche, España

RESUMEN

A lo largo de tres años (2016-18), se estudió la calidad de las aguas de los principales azarbes de la Vega Baja y del Baix Vinalopó, que confluyen en las desembocaduras de los ríos Segura y Vinalopó. En el año 2019 se analizaron antes y después de las inundaciones acaecidas en las comarcas del sur de la provincia de Alicante. En primer lugar, se obtuvieron las características promedio de la calidad de las aguas de los azarbes correspondiente al periodo 2016-18. Posteriormente, estos resultados muestran que no hay una diferencia importante entre los valores promedios obtenidos de la calidad de las aguas y los correspondientes al año 2019, antes y después de las inundaciones. Desde el punto de vista de la calidad química de las aguas analizada, no parece haberse alterado la notablemente función de la red de drenaje, destacando un ligero aumento de la salinidad en los azarbes situados más al sur de la provincia.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los recursos hídricos del sur de la Comunidad Valenciana por parte de la Universidad Miguel Hernández de Elche, promovido y financiado por la Dirección General del Agua entre los años 2016 y 2018, perteneciente en la actual *Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica de la Generalitat Valenciana*, es la base sobre la que se desarrolla el trabajo.

La valoración de la calidad de las aguas que se vierten en el sur de la Comunidad Valenciana y que pueden afectar a zonas costeras de gran valor ambiental, económico y social, como son las áreas litorales de Santa Pola, Elche, Guardamar del Segura, Torrevieja, Orihuela y Pilar de la Horadada, es uno de los pilares que fomentan este estudio. Los drenajes vertidos a través de la red situada en las comarcas valencianas de la Vega Baja del Segura y el Baix Vinalopó, tienen como principal origen la actividad agrícola, siendo sobrantes de riego, pero también se añaden aportes y escorrentías asociadas a la escorrentía y drenajes urbanos, las estaciones depuradoras de aguas residuales y los servicios industriales.

La agricultura es, con carácter general, la principal actividad asociada a la contaminación difusa del medio ambiente. Como indica la Agencia Europea de Medio Ambiente (2017), la contaminación difusa puede ser causada por una variedad de actividades que no tienen un punto de descarga de contaminantes específico. La agricultura es fuente de contaminación difusa, pero las zonas urbanas, la silvicultura, la deposición atmosférica, las viviendas rurales, y otras actividades localizadas en el medio rural también pueden ser fuentes importantes de contaminación. Los sistemas de drenaje de las zonas agrícolas, en gran medida, actúan como receptores de los contaminantes y canalizadores de los mismos, aunque resulta difícil establecer los focos que causan la contaminación.

En el caso de la contaminación puntual, se sabe concretamente el punto de descarga del contaminante al medio. Sin embargo, la densa red de drenaje que canaliza las descargas hacia los azarbes de las comarcas del Bajo Segura y del Baix Vinalopó dificulta la labor para establecer focos puntuales, ya que los vertidos se pueden producir en cualquier lugar o en amplias zonas de la red.

No obstante, sí que se conoce, por la confluencia de la red de drenaje, los dos puntos concretos de descargas de contaminación que afectan a las aguas costeras, las desembocaduras del río Segura y del Vinalopó. En el caso de los azarbes del sur de la Comunidad Valenciana, la contaminación que llega de tipo difuso a sus cauces procede de diversos espacios ocupados por actividades entre las que predomina la agricultura. La red de drenaje del sur alicantino se encarga de la transformación de un sistema de contaminación difusa, a un sistema de traslado lineal de contaminantes, en el sentido de que se desarrolla o progresa a lo largo de una línea que corresponde con el trazado de los propios azarbes, y finalmente una contaminación puntual en la zona costera (zona de descarga).

Se produce una acumulación de flujos, de forma dendrítica, que acaba localizando en dos áreas de pequeña dimensión en la costa, toda la carga de sustancias que arrastran y evacúan las escorrentías y lixiviados del sur de la Comunidad Valenciana. No debemos olvidar que con relación al río Segura, esta carga contaminante también puede proceder de la Región de Murcia.

Conocer la calidad química de las aguas, permite saber el estado de estas como posibles recursos, y los efectos que podrían desencadenar en su vertido al mar. Los objetivos de este trabajo son dos. El primero se centra en conocer la calidad media de las aguas de los principales azarbes que vierten a las zonas de desembocadura de las aguas de los ríos Vinalopó y Segura, con relación a la presencia de fuentes nitrogenadas y fósforo, cuyo origen puede asociarse a la actividad agrícola. El segundo, tras las inundaciones acontecidas en el mes de septiembre de 2019 que afectaron notablemente y de forma muy intensa a la comarca del Bajo Segura y la red de azarbes, se trata de valorar si se han producido cambios en la calidad química antes y después de las inundaciones, de manera que se constate o no el funcionamiento y la vuelta a la normalidad de la red de drenaje desde el punto de vista de su composición química.

2. MATERIALES, MÉTODOS Y ÁREA DE ESTUDIO

El seguimiento de la calidad de las aguas se centra en los azarbes que afectan a las desembocaduras

de los ríos Vinalopó y Segura. Tras los estudios realizados entre los años 2016 y 2018 (doce tomas de muestras: septiembre y noviembre de 2016, enero, marzo, mayo, julio, septiembre y noviembre de 2017, enero, marzo, mayo y julio de 2018), se han obtenido los valores promedios de las características de las aguas de los azarbes. Durante el año 2019, se procedió a un muestreo realizado en el mes de junio (inicio del verano) y un segundo muestreo en el mes de octubre (otoño), para determinar los posibles cambios en la calidad de las aguas debidas a las inundaciones.

Los parámetros seleccionados fueron el pH a 20ºC, la conductividad eléctrica a 25ºC, y formas solubles de nitrógeno (nitratos, nitritos y amonio) y fósforo, determinados siguiendo la metodología descrita por APHA-AWWA-WEF (2012).

Es fundamental conocer la calidad de los vertidos que se producen en las costas. especialmente en lo referido a los aportes de nitrógeno y fósforo, es decir, la descarga de nutrientes. Estos pueden desencadenar procesos de proliferación biológica que superen los límites naturales y ocasionen problemas y desequilibrios en los ecosistemas.

La situación del área de estudio está delimitada por la costa del sur de la Comunidad Valenciana, entre el Cabo de l'Aljub (Santa Pola) y al sur por el Cabo Cervera (Torrevieja). La ocupan los tramos finales de las cuencas de los ríos Segura y Vinalopó, sobre suelos aluviales, principalmente fluvisoles, junto con antrosoles, solonchacks y calcisoles entre otros (IUSS Working Group WRB, 2015) y con un relieve predominantemente llano, rodeado de las estribaciones nororientales de las Béticas y con serranías como las de Orihuela y Callosa, el Molar y l'Aljub en Santa Pola.

El conjunto de azarbes estudiados tiene caudales sujetos a variaciones estacionales, a la frecuencia e intensidad de los riegos y la climatología de la zona, especialmente en ocasiones de lluvias torrenciales e inundaciones. Precisamente esta es la situación que se produjo en el año 2019, y permite valorar el efecto de estos eventos de precipitaciones extraordinarias en la calidad de las aguas, lo que da un valor relevante a los resultados y facilita comprobar la capacidad de recuperación de la normalidad del sistema.

Los azarbes están agrupados en dos grandes conjuntos determinados por el destino de sus efluentes: los azarbes asociados al Vinalopó y aquellos que aportan sus aguas en la desembocadura del río Segura. Con relación a los primeros, los considerados en este estudio son los siguientes: *Dalt* o Cebadas, *Robatori*, Dulce y Ancha o *Ampla*. Los azarbes considerados asociados al río Segura y que acompañan a este en la desembocadura artificial creada en la población de Guardamar del Segura son los siguientes: Convenio, Pineda, Mayayo, Acierto, Enmedio, Culebrina, La Reina, De la Villa y De la Comuna.

Los azarbes analizados en la zona de desagüe de aguas del río Vinalopó y del río Segura se detallan esquemáticamente en la figura 1.

La importancia de cada uno de los azarbes es variable, puesto que algunos reciben numerosos aportes de otros azarbes menores y azarbetas, y amplían notablemente su área de influencia, frente a otros que disponen de una menor red de drenaje. Además, estas redes se entrecruzan a varios niveles, generando un entramado singular y complejo. Del mismo modo, las zonas agrícolas cultivadas, las que disponen de parcelas abandonadas, y las transformadas para otras actividades (residencial, industrial, recreativo), generan una situación poco uniforme en el territorio en cuanto a los usos del suelo.



Figura 1. Azarbes analizados asociados al río Vinalopó (a) y Segura (b), y las zonas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

Otro factor influyente es el de la transformación de los sistemas de riego, con la sustitución del riego a manta por otros sistemas, que puede influir a corto y medio plazo en la reducción de los volúmenes de aguas drenadas que van a parar a los azarbes, disminuyendo sus caudales, siendo especialmente preocupante la reducción del lavado de los suelos y su salinización, la pérdida de aportes hídricos a las zonas húmedas y la falta de agua de calidad de la que no se dispone para otros sistemas de riego no tradicionales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se muestran son, por un lado, los valores medios de la calidad de las aguas, que consideraremos como valor de referencia a la hora de comparar con los obtenidos en el año 2019, en el que se han visto influenciados por los eventos de fuertes precipitaciones e inundaciones acaecidos en el mes de septiembre.

Los resultados se muestran para cada uno de los parámetros analizados, dando los valores promedios y los determinados en los muestreos del mes de junio y de octubre de 2019, previos a la época estival de alta demanda de agua para riego y transcurrido un mes desde que se produjeron las lluvias torrenciales que anegaron buena parte de la zona de estudio.

3.1. pH

Los valores de pH encontrados en los azarbes (tabla 1) son muy similares en todos ellos. Se sitúan entre 7,7 y 8,1 unidades de pH, ligeramente básico. El control de este pH está asociado principalmente al contenido en sales, aunque vertidos ocasionales podrían modificar puntualmente este parámetro.

En líneas generales, tanto en el muestreo previo a la época estival como en el realizado un mes después de las lluvias torrenciales, los valores de pH se sitúan en la misma línea que los datos medios obtenidos para todos ellos en los estudios realizados en los años anteriores. De todos los azarbes, es el de la Reina el que presenta los mayores valores de pH, aunque son escasas las diferencias.

Punto de muestreo	Valor medio 2016-18	Desviación estándar	20/06/19	Desviación estándar	15/10/19	Desviación estándar
Azarbe de Dalt	7,9	0,2	7,7	0,1	7,8	0,1
Azarbe del Robatori	7,8	0,2	7,7	0,1	7,8	0,1
Azarbe Dulce	7,9	0,2	8,0	0,1	8,0	0,1
Azarbe Ancha	7,8	0,2	7,9	0,1	7,7	0,1
Azarbe del Convenio	7,9	0,2	7,7	0,1	7,6	0,1
Azarbe de Pineda	7,9	0,1	7,8	0,1	7,9	0,1
Azarbe Mayayo	8,0	0,2	8,5	0,1	8,1	0,1
Azarbe del Acierto	7,8	0,2	7,9	0,1	7,9	0,1
Azarbe de Enmedio	8,0	0,2	8,3	0,1	8,0	0,1
Azarbe Culebrina	7,9	0,1	7,7	0,1	7,8	0,1
Azarbe de la Reina	8,1	0,2	8,0	0,1	7,9	0,1
Azarbe de la Villa	8,0	0,2	7,9	0,1	8,0	0,1
Azarbe de la Comuna	7,9	0,2	7,9	0,1	8,0	0,1

Tabla 1. pH (uds. de pH) a 20ºC. Fuente: elaboración propia.

3.2. Conductividad eléctrica

Con relación a la salinidad, determinada en función de la conductividad eléctrica expresada a 25ºC, destacan, sobre todo, el conjunto de azarbes de la vertiente del río Vinalopó como más salinos, exceptuando el Dulce. Los valores son muy superiores a los obtenidos en los correspondientes a la vertiente del Segura. Por encima de todos los cauces estudiados, destaca los valores medios del azarbe de Dalt y Ancha (tabla 2).

En el caso de la vertiente del Segura, es el azarbe del Convenio el que da valores similares a los de los azarbes mencionados en el caso de la vertiente del Vinalopó, es el más salino. Este, junto con los anteriores, atraviesan zonas donde los suelos poseen mayores concentraciones de sales, próximos a los embalses de El Hondo (Meléndez et al., 2010) y es previsible que haya importantes aportes de sales solubles procedentes de los suelos.

Con relación a los eventos de fuertes precipitaciones, se aprecian cambios en la salinidad entre junio y octubre de 2019, que podrían ser explicados por las escorrentías y lavados del suelo provocados por las aguas de las inundaciones y su paso a los azarbes.

En el caso de la vertiente del río Vinalopó, se detecta en el año 2019 un descenso de la salinidad exceptuando el azarbe Dulce. Este efecto es ligeramente el contrario en la vertiente del Segura, debido probablemente al fuerte lavado de sales de los suelos de la Vega Baja y su paso a los azarbes.

Punto de muestreo	Valor medio 2016-18	Desviación estándar	20/06/19	Desviación estándar	15/10/19	Desviación estándar
Azarbe de Dalt	12,8	3,4	11,1	11,1	6,6	0,1
Azarbe del Robatori	9,1	3,2	7,1	7,1	7,7	0,1
Azarbe Dulce	3,1	0,5	3,4	3,4	4,8	0,1
Azarbe Ancha	11,0	2,0	10,1	0,1	11,6	0,1
Azarbe del Convenio	10,8	1,1	10,1	0,1	10,1	0,1
Azarbe de Pineda	7,1	2,2	5,8	0,1	6,9	0,1
Azarbe Mayayo	6,2	2,8	3,1	0,1	4,9	0,1
Azarbe del Acierto	5,7	1,6	3,2	0,1	5,5	0,1
Azarbe de Enmedio	4,8	1,1	3,6	0,1	5,1	0,1
Azarbe Culebrina	4,7	1,0	4,7	0,1	5,1	0,1
Azarbe de la Reina	3,7	0,8	2,8	0,1	4,5	0,1
Azarbe de la Villa	4,0	0,9	3,8	0,1	4,6	0,1
Azarbe de la Comuna	3,8	0,9	3,4	0,1	4,6	0,1

Tabla 2. Conductividad eléctrica (mS/cm) a 25ºC. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, los grandes azarbes como Ancha y El Convenio, no parecen verse afectados de la misma manera que el resto, y no varían en general sus valores de conductividad eléctrica que de por sí, ya eran elevados.

3.3. Formas nitrogenadas

La presencia de nitrógeno, especialmente de nitratos en las aguas, es uno de los factores más importantes en cuanto al aporte de nutrientes y sus efectos en el medio ambiente. Es conocido el fenómeno de la eutrofización de las aguas por un exceso de nutrientes y la posterior explosión biológica, puede provocar anoxia y la mortandad de especies acuícolas.
Sin embargo, conviene destacar que los valores medios de nitratos obtenidos para estos azarbes no superan los 50 mg/l, por debajo de los límites máximos permitidos en aguas de consumo (Ministerio de la Presidencia, 2003). De todas formas, puntualmente se superan estos valores en algunos de los azarbes, especialmente los que confluyen en el río Segura (tabla 3).

En líneas generales, se puede indicar en cuanto a la calidad de las aguas, que la concentración de nitratos es superior en los azarbes del ámbito del río Segura que en los correspondientes al río Vinalopó y, por tanto, las descargas de este nutriente en las zonas costeras pueden ser más importantes en Guardamar del Segura que en Santa Pola.

Ciñéndonos estrictamente a criterios de calidad de agua para riego dados por la FAO (Ayers y Westcot, 1985), el valor del contenido en nitratos de los azarbes del Segura se aproxima al valor establecido por estos autores para aguas con grado de restricción en el uso para riego “ligero o moderado” (comprendido entre 5 y 30 mg/l expresado como N, contenido en forma de nitrato).

Conviene destacar con relación a los nitratos, la fuerte presencia tras la DANA (depresión aislada en niveles altos) en el azarbe Dulce, cuyo origen debe de estar asociado al lavado de los suelos con

actividades agropecuarias. Este hecho se repite en el caso de los fosfatos como veremos con posterioridad, donde este azarbe también ha destacado siempre sobre los demás por su elevado contenido en este nutriente en forma soluble.

La presencia de nitrógeno en forma de nitritos es más inestable que las otras dos formas inorgánicas estudiadas, pero tiene reconocidos efectos tóxicos, especialmente en mamíferos, y al igual que en el caso del nitrato, puede ser precursor de sustancias cancerígenas como las nitrosaminas (Junta de Andalucía, 2017). Las concentraciones detectadas generalmente son bajas.

En el caso del amonio, la presencia en aguas marinas puede provocar efectos tóxicos en larvas marinas, más que estimular el crecimiento algal. La presencia de amonio en concentraciones de 10 µM (aproximadamente 0,2 mg/l), puede ser tóxica para las larvas marinas, especialmente para los moluscos (EPA, 2001). Por estas razones comentadas, debemos entender el potencial efecto negativo de los nutrientes en las costas y los niveles mayores de amonio tras las lluvias torrenciales encontrados en los azarbes de la vertiente del Segura.

Punto de muestreo	Valor medio 2016-18	Desviación estándar	20/06/19	Desviación estándar	15/10/19	Desviación estándar
Nitratos						
Azarbe de Dalt	14,2	10,7	4,1	0,1	18,3	0,1
Azarbe del Robatori	22,5	13,0	5,7	0,1	18,6	0,3
Azarbe Dulce	18,0	12,5	0,7	0,1	53,5	0,1
Azarbe Ancha	20,1	15,5	12,1	0,1	13,9	0,1
Azarbe del Convenio	41,9	5,4	14,8	0,1	32,9	0,1
Azarbe de Pineda	22,9	14,9	14,1	0,1	18,8	0,1
Azarbe Mayayo	23,2	21,5	0,4	0,1	26,6	0,1
Azarbe del Acierto	39,3	18,2	5,5	0,1	24,3	0,1
Azarbe de Enmedio	33,3	18,5	3,7	0,1	29,0	0,3
Azarbe Culebrina	45,1	16,7	16,8	0,1	26,4	0,3
Azarbe de la Reina	34,6	10,5	7,6	0,1	21,2	0,2
Azarbe de la Villa	42,3	14,1	18,0	0,1	27,4	0,1
Azarbe de la Comuna	38,1	18,2	13,7	0,1	29,6	0,2
Nitritos						
Azarbe de Dalt	0,3	0,3	0,1	0,1	0,5	0,1
Azarbe del Robatori	0,3	0,2	0,4	0,1	0,5	0,1
Azarbe Dulce	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
Azarbe Ancha	0,3	0,2	0,6	0,1	0,4	0,1
Azarbe del Convenio	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,1
Azarbe de Pineda	0,4	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1
Azarbe Mayayo	0,4	0,3	0,1	0,1	0,5	0,1
Azarbe del Acierto	0,7	0,4	0,5	0,1	0,5	0,1

Punto de muestreo	Valor medio 2016-18	Desviación estándar	20/06/19	Desviación estándar	15/10/19	Desviación estándar
Azarbe de Enmedio	0,7	0,4	0,7	0,1	0,7	0,1
Azarbe Culebrina	0,8	0,4	0,7	0,1	0,7	0,1
Azarbe de la Reina	0,7	0,5	0,6	0,1	0,7	0,1
Azarbe de la Villa	0,8	0,4	0,6	0,1	0,6	0,1
Azarbe de la Comuna	0,8	0,4	1,1	0,1	1,0	0,1
Amonio						
Azarbe de Dalt	0,4	0,5	0,1	0,1	0,2	0,1
Azarbe del Robatori	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
Azarbe Dulce	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1
Azarbe Ancha	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Azarbe del Convenio	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Azarbe de Pineda	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1
Azarbe Mayayo	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
Azarbe del Acierto	0,7	0,9	0,1	0,1	0,6	0,1
Azarbe de Enmedio	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1
Azarbe Culebrina	0,6	0,4	0,4	0,1	1,1	0,1
Azarbe de la Reina	0,3	0,3	0,1	0,1	2,3	0,1
Azarbe de la Villa	0,4	0,2	0,2	0,1	0,4	0,1
Azarbe de la Comuna	0,5	0,3	0,2	0,1	0,9	0,1

Tabla 3. Formas nitrogenadas (mg/l). Fuente: elaboración propia.

3.4. Fosfatos

El fósforo es otro de los nutrientes que ejercen un control muy relevante en la biología de las aguas. Al igual que el nitrógeno, puede desencadenar explosiones biológicas indeseables. Se realizaron las mediciones de ortofosfato soluble presente en las aguas, es decir, la especie química más directamente asimilable y la principal que influye en su incorporación a las aguas marinas (Kennish, 1989), con un mayor riesgo para el medio acuático de forma inmediata. En este caso, los valores más relevantes, en relación a la calidad de las aguas, se encontraron en el azarbe Dulce. Además de en este azarbe, las mayores concentraciones de fosfatos fueron determinadas en el año 2019 con posterioridad a las precipitaciones acaecidas en septiembre.

Sin embargo, con carácter general, los azarbes asociados a la desembocadura del río Segura, aportan más fosfatos que los asociados al río Vinalopó.

Punto de muestreo	Valor medio 2016-18	Desviación estándarSD	20/06/19	Desviación estándar	15/10/19	Desviación estándar
Azarbe de Dalt	0,6	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1
Azarbe del Robatori	0,7	0,3	0,5	0,1	0,1	0,1
Azarbe Dulce	9,5	6,7	5,7	0,1	13,9	0,1
Azarbe Ancha	0,5	0,2	0,2	0,1	0,5	0,1
Azarbe del Convenio	0,9	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1
Azarbe de Pineda	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Azarbe Mayayo	0,5	0,4	0,1	0,1	0,4	0,1
Azarbe del Acierto	1,1	0,2	0,5	0,1	0,4	0,1
Azarbe de Enmedio	1,0	0,5	0,1	0,1	0,3	0,1
Azarbe Culebrina	1,4	0,3	0,9	0,1	0,8	0,1
Azarbe de la Reina	1,3	0,3	1,2	0,1	1,1	0,1
Azarbe de la Villa	1,7	0,5	1,3	0,1	0,8	0,1
Azarbe de la Comuna	2,3	0,7	2,2	0,1	1,6	0,1

Tabla 4. Fosfatos (mg/l). Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Los datos relativos a la calidad de las aguas indican que la carga de nutrientes es mayor en los azarbes del Bajo Segura que en los del Vinalopó, aunque la salinidad es superior en estos.

Los efectos de las inundaciones se dejan notar en algunos parámetros, cambiando los valores antes y después de las inundaciones y difiriendo de los valores medios obtenidos para los años 2016-18. En general, se aprecia un ligero aumento de la salinidad en los azarbes del Bajo Segura como hecho más destacado, que debe estar asociado al lavado de las sales de los suelos.

En líneas generales, los valores obtenidos en el año 2019 no difieren mucho de los valores promedio calculados con los datos de los años anteriores, con lo que podemos indicar que, desde el punto de vista del análisis químico de estas aguas, su funcionamiento como red de drenaje no se ha visto significativamente alterado.

REFERENCIAS

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2017). *Diffuse sources*. https://www.eea.europa.eu/themes/water/water-pollution/diffuse-sources
- APHA, AWWA, WEF. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1985). *Water quality for agriculture*. FAO irrigation and drainage paper nº 29.
- EPA, Environmental Protection Agency. (2001). *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual*

Estuarine and Coastal Marine Waters. EPA-822-B-01-003.

- IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Junta de Andalucía. (2017). *Efectos de los nitratos en la salud*. http://www.juntadeandalucia.es/salud/export/sites/csalud/galerias/documentos/c_3_c_2_medio_ambiente_y_salud/aguas_consumo_publico/contaminacion_nitratos5.pdf
- Kennish, M.J. (1989). *Practical Handbook of Marine Science*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Meléndez, I., Navarro-Pedreño, J., Koch, M. and Gómez, I. (2010). Applying imaging spectroscopy techniques to map saline soils with ASTER images. *Geoderma*, 158, 55-65.
- Ministerio de la Presidencia. (2003). *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. BOE núm. 45, 7228-7245.

DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES: EVOLUCIÓN LEGISLATIVA Y RÉGIMEN VIGENTE

Ángel Menéndez Rexach
Universidad Autónoma de Madrid
menendez.rexach@uam.es

RESUMEN

Hasta hace relativamente pocos años se ha prestado muy poca atención a la delimitación de las zonas inundables, lo que ha propiciado la tolerancia de asentamientos humanos en esas zonas, con consecuencias lamentables que, en muchas ocasiones, podrían haberse evitado. Tras la incorporación al derecho interno de la Directiva de inundaciones, la situación normativa es satisfactoria. Los planes de gestión del riesgo de inundación son los instrumentos específicos para afrontar estas situaciones, aunque las determinaciones normativas no están en ellos sino en los Planes Hidrológicos de Demarcación. La delimitación de las zonas inundables es competencia de la Administración urbanística, que debe apoyarse en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Este sistema cartográfico debe ser el marco de referencia para la coordinación interadministrativa en la materia. La ordenación territorial y urbanística deberá reflejar esa delimitación, aunque pueda establecer una cartografía más detallada. En la Comunidad Valenciana hay una duplicidad de instrumentos, que, sin duda, tiene una explicación en su origen, pero que debería reconducirse en un intento de aunar esfuerzos.

1. INTRODUCCIÓN

Esta Comunicación se presenta como complemento de la ponencia del autor sobre "Limitaciones al uso del suelo en zonas inundables: legislación de aguas, urbanística y de protección civil". Las inundaciones son la catástrofe natural que mayor daño genera en España. Pero hasta hace relativamente pocos años se ha prestado muy poca atención a la delimitación de las zonas inundables, lo que ha propiciado la tolerancia (cuando no la permisividad) de asentamientos humanos en esas zonas, con consecuencias lamentables, que en muchas ocasiones podrían haberse evitado. Afortunadamente, tras la incorporación al derecho interno de la Directiva de inundaciones, la situación normativa es satisfactoria, como se verá en su momento. Los planes de gestión del riesgo de inundación son los instrumentos específicos para afrontar estas situaciones, aunque las determinaciones normativas no están en ellos sino en los Planes Hidrológicos de Demarcación.

2. LEGISLACIÓN DE AGUAS[1]

La Ley de Aguas establece que "*los terrenos que puedan resultar inundados durante las crecidas no ordinarias de los lagos, lagunas, embalses, ríos y arroyos, conservarán la calificación jurídica y la titularidad dominical que tuvieran*" (art. 11.2 del Texto Refundido de 2001, en adelante TRLA). Este artículo (apartado 3) autoriza al Gobierno de la Nación y a los Gobiernos autonómicos a imponer limitaciones en el uso de *las zonas inundables* para garantizar la seguridad de las personas y bienes. El Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) aclaró que "*se consideran zonas inundables las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período*

[1] Para más detalle, véase MENENDEZ REXACH A. 2016, p. 90 y ss.

estadístico de retorno sea de quinientos años, a menos que el Ministerio de Medio Ambiente, a propuesta del Organismo de cuenca fije la delimitación que en cada caso resulte más adecuada al comportamiento de la corriente" (art. 14.3). El período de retorno de 500 años como referencia única para la delimitación de las zonas inundables ha sido y sigue siendo cuestionado[2].

La Ley de Aguas, en su redacción originaria, incluía en el contenido obligatorio de los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) "los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos" (art. 40. l). La misma obligación se mantiene para los actuales Planes de Demarcación. Estos planes no delimitan las zonas inundables, pero establecen limitaciones al uso del uso de conformidad con lo previsto en la legislación de aguas. La Ley del Plan Hidrológico Nacional de 2001 dispuso que "las Administraciones competentes delimitarán las zonas inundables teniendo en cuenta los estudios y datos disponibles que los Organismos de cuenca deben trasladar a las mismas, de acuerdo con lo previsto en el artículo 11.2 de la Ley de Aguas. Para ello contarán con el apoyo técnico de estos Organismos y, en particular, con la información relativa a caudales máximos en la red fluvial, que la Administración hidráulica deberá facilitar" (art. 28.2). Resultaba así que la delimitación de las zonas inundables era función de las Administraciones competentes en materia de ordenación territorial y urbanística, a las que los organismos de cuenca darán traslado de los datos y estudios que posean sobre estas materias para que los tengan en cuenta en la planificación del suelo y, en particular, en las autorizaciones de usos que se acuerden en las zonas inundables (art. 11.2 TRLA y 59.3 RPH).

Era bastante discutible que la delimitación de las zonas inundables debiera corresponder a la Administración urbanística y no a la gestora del agua, que es quien tiene más datos y mayor especialización. La cuestión tiene enorme trascendencia práctica, por los riesgos inherentes a la construcción de viviendas y la implantación de otras actividades en zonas susceptibles de inundación. Pero eso no significa que la delimitación de estas zonas deba corresponder a la Administración urbanística. Esta tiene que apoyarse en la información que le proporcione la Administración hidráulica para excluir estas zonas del proceso urbanizador.

Afortunadamente, la normativa posterior ha puesto las cosas en su sitio. Aunque la delimitación de las zonas inundables siga siendo competencia de la Administración urbanística, su labor quedará muy facilitada por los trabajos realizados por la Administración hidráulica, en particular por los mapas de riesgo de inundación, a los que nos referiremos después.

En la modificación del RDPH aprobada por RD 9/2008, de 11 de enero, se estableció *el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (art. 14.3)[3]. Esta cartografía debe delimitar los cauces públicos, las zonas de servidumbre y policía, incluyendo las vías de flujo preferente[4] y la zona

[2] Cfr. DIEZ HERRERO A., 2017, p. 187 y LLASAT BOTIJA M.C, 2017, p. 214). El primero de estos autores señala como precedente la OM de 31/03/1967 (p. 194) y propone modificar los criterios de delimitación (p. 197-8).

[3] "El conjunto de estudios de inundabilidad realizados por el Ministerio de Medio Ambiente y sus organismos de cuenca configurarán el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, que deberá desarrollarse en colaboración con las correspondientes comunidades autónomas, y, en su caso, con las administraciones locales afectadas. En esta cartografía, además de la zona inundable, se incluirá de forma preceptiva la delimitación de los cauces públicos y de las zonas de servidumbre y policía, incluyendo las vías de flujo preferente"

[4] Art. 14.3: "La zona de flujo preferente es aquella zona constituida por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe, y de la zona donde, para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas" (art. 9.2, párrafo segundo, del RDPH, en la redacción introducida por el propio RD 9/2008, de 11 de enero). El párrafo 4º del mismo artículo aclara que "Se entiende por vía de intenso desagüe la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobreelevación mayor que 0,3 m, respecto a la cota de la lámina de agua que se produciría con esa misma avenida considerando toda la llanura de inundación existente. La sobreelevación anterior podrá, a criterio del organismo de cuenca, reducirse hasta 0,1 m cuando

inundable. Esta modificación reglamentaria partió de la reconsideración del significado de la zona de policía, para centrarlo en la protección del régimen de corrientes[5], por lo que esa zona se puede ampliar para incluir las vías o zonas de flujo preferente (art. 9.2 RDPH), estableciendo así criterios de gestión del riesgo de inundaciones que garanticen al máximo la seguridad de los ciudadanos, en coherencia con la Directiva de inundaciones[6], incorporada al derecho interno por el RD 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que incorporó al Derecho interno la Directiva de inundaciones.

Este RD ordenó la elaboración, para cada demarcación hidrográfica, de mapas de peligrosidad por inundación en los que se deberán tener en cuenta, al menos, los escenarios alta probabilidad de inundación, probabilidad media de inundación (periodo de retorno mayor o igual a 100 años) y baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos (periodo de retorno igual a 500 años).

La información contenida en estos mapas será la referencia para la elaboración de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI)[7] y también para la determinación de las zonas inundables en el planeamiento territorial y urbanístico. En consecuencia, para determinar el régimen de usos en las zonas inundables hay que diferenciar entre la ZFP y el resto de la zona inundable (ZI). Es importante recordar que toda la ZI está fuera del DPH. La ZFP estará, normalmente, dentro de la zona de policía, pudiendo ampliarse ésta para incluir toda la ZFP. En la cartografía deberán reflejarse todos esos elementos: los cauces públicos (DPH), las zonas de servidumbre y policía, incluyendo las ZFP y el resto de la ZI.

Los PGRI contienen, en síntesis: a) las conclusiones de la evaluación preliminar del riesgo de inundación; b) los mapas de peligrosidad y los mapas de riesgo de inundación; c) una descripción de los objetivos de la gestión del riesgo de inundación en la zona concreta a que afectan; d) un resumen de los criterios especificados por el plan hidrológico de cuenca sobre el estado de las masas de agua y los objetivos ambientales fijados para ellas en los tramos con riesgo potencial significativo por inundación; e) un resumen del contenido de los planes de protección civil existentes; f) una descripción de los sistemas y medios disponibles en la cuenca para la obtención de información hidrológica en tiempo real durante los episodios de avenida, así como de los sistemas de predicción

el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5 m en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos".

[5] El preámbulo del RD 9/2008 explica que "La zona de policía adquiere su auténtica relevancia en la protección del régimen de corrientes, fijándose criterios técnicos para que esa protección del régimen de corrientes sea eficaz, y se pone un énfasis especial en la posibilidad de ampliar los 100 metros de anchura de dicha zona, cuando sea necesario para la seguridad de las personas y bienes, estableciéndose, asimismo, criterios técnicos precisos para evaluar tal posibilidad. Las zonas que cumplen los dos requisitos anteriores -proteger el régimen de corrientes en avenidas y reducir el riesgo de producción de daños en personas y bienes- se denominan zonas de flujo preferente, y en ellas el Organismo de cuenca solo podrá autorizar actividades no vulnerables frente a las avenidas. De esta manera, se da cumplimiento a las exigencias de la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, que determina que los Estados miembros deben incorporar políticas sobre gestión del riesgo de inundaciones que garanticen al máximo la seguridad de los ciudadanos, adoptando criterios adecuados de usos del suelo, y que permitan la laminación de caudales y de carga sólida transportada ampliando, en la medida de lo posible, el espacio fluvial disponible".

[6] En ella que se define la «inundación» como "anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por agua. Incluye las inundaciones ocasionadas por ríos, torrentes de montaña, corrientes de agua intermitentes del Mediterráneo y las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras, y puede excluir las inundaciones de las redes de alcantarillado" y el «riesgo de inundación» como "combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de las posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a una inundación". Las definiciones de vía de flujo preferente y zona de intenso desagüe no están en la Directiva.

[7] El Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, preveía para antes del 22 de diciembre de 2015 la aprobación de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI). La mayor parte de los planes de gestión del riesgo de inundación (16 demarcaciones hidrográficas), fueron aprobados por el Gobierno, en reunión. del Consejo de Ministros del 15 de enero de 2016 y publicados en el BOE nº 19, de 22 de enero de 2016.

y ayuda a las decisiones disponibles; g) un resumen de los programas de medidas, con indicación de las prioridades entre ellos, que cada Administración Pública, en el ámbito de sus competencias, ha aprobado para alcanzar los objetivos previstos; h) el conjunto de programas de medidas (preventivas y paliativas, estructurales o no estructurales) y, en concreto, las de restauración fluvial, conducentes a la recuperación del comportamiento natural de la zona inundable, las de mejora del drenaje de infraestructuras lineales, las de predicción de avenidas, las de protección civil, las de ordenación territorial y urbanismo, las de promoción de seguros frente a inundaciones (en especial, los agrarios) y, finalmente, las medidas estructurales planteadas y los estudios coste-beneficio que las justifican, así como las posibles medidas de inundación controlada de terrenos.

Es obvio que los PGRI podrían tener carácter normativo, como lo tienen los PHD, pero a los vigentes no se les atribuido ese carácter, quizá porque son planes de "gestión", no de "ordenación". Cumplen una función de coordinación interadministrativa para prevenir y afrontar las inundaciones, recordando a todos los organismos implicados las pautas de actuación que deben seguir tanto en la fase de prevención como en la de reacción ante la situación de emergencia una vez producida.

La diferencia entre ambos tipos de planes se refleja en su documentación. Los PHD se estructuran en memoria, normativa del plan y anejos, mientras que la documentación de los PGRI consta de memoria y anejos, sin normativa. Por eso, en el Real Decreto de aprobación sólo se hace referencia a su estructura, remitiendo la publicidad de la memoria y anexos a la sede electrónica del organismo de cuenca respectivo, así como a la web del MAGRAMA y del Ministerio del Interior[8]. Ahora bien, el carácter no normativo de los planes de inundación no impide la integración de su contenido (un resumen de él) en el del PHD. Al contrario, debe formar parte de él, como resumen de las medidas adoptadas, según lo dispuesto en el TRLA, el RPH y el propio RD 903/2010 (art. 14.1). No hay obstáculo alguno para ello, ya que no todo el contenido de los PHD es normativo.

El PHD del Segura dispone que los planes territoriales y urbanísticos deberán reflejar en su parte informativa el dominio público hidráulico y sus zonas de servidumbre y policía, así como las zonas de riesgo de inundación (art. 55.1).

La revisión y actualización de la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) debía realizarse antes del 22 de diciembre de 2018 y ser enviada a la Comisión Europea antes del 22 de marzo de 2019. Sin embargo, la de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias se aprobó algo más tarde por Resolución de 12 de abril de 2019, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente (BOE de 27 de mayo de 2019).

3. LEGISLACIÓN DE PROTECCIÓN CIVIL

La "Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones" fue aprobada por el Consejo de Ministros, en 9 de diciembre de 1994[9]. Define las *inundaciones* como "sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada". En esta definición, sustancialmente coincidente con la de la Directiva de inundaciones, destaca el carácter temporal y ocasional de la inundación.

[8] Art. 2.2 del RD 18/2016, de 15 de enero: "La estructura de todos estos planes, de acuerdo con el Real Decreto 903/2010, consiste en una memoria con 10 capítulos y, en general, cinco anexos con los siguientes títulos: Anexo I: Caracterización de las ARPSIs. Anexo II: Descripción del programa de medidas. Anexo III: Resumen de los procesos de información pública y consulta y sus resultados. Anexo IV: Medidas específicas de coordinación con la parte internacional de la Demarcación Hidrográfica. Anexo V: Listado de autoridades competentes.

[9] BOE 14 de febrero de 1995. El trabajo de referencia sobre el tema es LÓPEZ DE CASTRO GARCÍA-MORATO L. 2011, 249 y ss.

Al enumerar los "elementos básicos para la planificación de protección civil ante el riesgo de inundaciones", se incluye el "análisis de las zonas inundables", cuya finalidad es "la identificación y clasificación de las áreas inundables del territorio a que cada Plan se refiera", con arreglo a los criterios que se indican (zonas de inundación frecuente, de inundación ocasional y de inundación excepcional). Esta "zonificación territorial" es también sustancialmente coincidente con la del RD 903/2010 (probabilidad alta, media y baja) y "se revisará teniendo en cuenta la delimitación de zonas que, al objeto de la aplicación del artículo 14 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, se derive del desarrollo de los Planes Hidrológicos de Cuenca" (2.2.1). Como puede apreciarse, aquí hay un punto de conexión importante con la legislación de aguas. La zonificación que deben contener los Planes de Protección Civil no es necesariamente coincidente con la "delimitación" que resulte del desarrollo de los PHC, pero debe "tenerla en cuenta", revisándose aquélla a la vista de ésta.

La clasificación de las zonas se hace, lógicamente, en función del riesgo (alto, significativo y bajo), identificando también las áreas de posibles evacuaciones, las que puedan quedar aisladas y los posibles núcleos de recepción y albergue de las personas evacuadas (2.2.2). Esta zonificación debe ser objeto de los Planes de las Comunidades Autónomas (3.4.2), que habrán de precisar los datos relevantes de cada zona, incluyendo su localización y superficie, lo que implica una identificación precisa de sus contornos.

La Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil, prevé que las actuales Directrices Básicas se incluyan en la Norma Básica de Protección Civil (art. 13), que todavía no se ha dictado. El sistema de planificación está integrado por el Plan Estatal General, los Planes Territoriales, de ámbito autonómico o local, los Planes Especiales y los Planes de Autoprotección (art. 14.2). Son planes especiales, entre otros, los que tienen por finalidad hacer frente a riesgos de inundaciones y “fenómenos meteorológicos adversos” (art. 15.3), entre los que podrán incluirse las sequías. Lógicamente, esa función debería corresponder a los PGRI, por lo que cualquier duplicidad introduciría una complejidad innecesaria.

La Ley prevé la elaboración de dos estrategias diferentes (art. 4):

– Una Estrategia Nacional de Protección Civil que integrará y alineará todas las actuaciones de la Administración General del Estado en el ámbito de la protección civil, que debe ser aprobada por el Consejo de Seguridad Nacional a propuesta del Ministro del Interior.
– Una Estrategia del Sistema Nacional de Protección Civil que debe servir de base a las actuaciones de las distintas administraciones territoriales en el ámbito de sus respectivas competencias. Las líneas básicas de esta Estrategia del Sistema, las aprobará el Consejo Nacional de Protección Civil, máximo órgano de coordinación interadministrativa en este ámbito.

La primera se hizo pública por Orden PCI/488/2019, de 26 de abril (BOE de 30 de abril). Configura al Sistema Nacional de Protección Civil como parte esencial del Sistema de Seguridad Nacional, para permitir al Gobierno de la Nación afrontar la gestión de las amenazas y los riesgos con un enfoque integral. El primero de los riesgos que toma en consideración es el de inundaciones. Entre los instrumentos normativos y de gestión menciona la Directiva de inundaciones y el RD 903/2010, la directriz básica de emergencias ante el riesgo de inundaciones de 1994, que tendrá que integrarse en la futura Norma Básica de Protección Civil y el Plan Estatal de Inundaciones aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros de 29 de julio de 2011 (4.1.3). Entre las actuaciones prioritarias incluye (4.1.4):

- Fortalecer la vinculación de la planificación de protección civil en los planes de ordenación del territorio, uso del suelo y desarrollo urbanístico.

- Promover el uso del Sistema Nacional de Cartografía de zonas inundables, identificando los elementos más vulnerables a efectos de protección civil en dichas áreas.

A escala europea, el Mecanismo de Protección Civil de la Unión[10] tiene por objetivo, desde 1º de enero de 2014, reforzar la cooperación entre esta y los Estados miembros con el fin de mejorar la eficacia de los sistemas de prevención, preparación y respuesta ante catástrofes naturales o de origen humano (art. 1.1). Para ello establece un Centro de Coordinación encargado de canalizar las solicitudes de ayuda, incluso las procedentes de fuera de la Unión, y un sistema de comunicación e información, gestionado por la Comisión, con puntos de contacto en los Estados miembros. En el Mecanismo europeo se inspiró la citada Ley de Protección Civil de 2015, según explica su preámbulo.

4. LEGISLACIÓN DE ORDENACIÓN DEL TERRITORIO Y URBANISMO

La legislación estatal de suelo dispone que estarán en la situación básica de suelo rural los terrenos "*con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación o de otros accidentes graves*" (art. 21.2.a. del Texto Refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana de 2015, TRLSRU). Por consiguiente, las zonas inundables, al estar en esa situación básica, se deberán clasificar como suelo no urbanizable (o rústico), salvo que se adopten las medidas necesarias para prevenir el riesgo de inundación, en cuyo caso podrían clasificarse como urbanizables. En la misma línea, el art. 15 RD 903/2010 es concluyente. Al establecer las reglas de coordinación con otros planes, afirma rotundamente que los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación que hagan de los usos del suelo, "reconocerán el carácter rural de los suelos en los que concurran dichos riesgos de inundación". Se trata de un mandato de futuro, que debe armonizarse con las situaciones existentes, en las que es evidente que hay suelos urbanos inundables.

La legislación autonómica de ordenación territorial y urbanística, con mayor o menor intensidad, toma en consideración el riesgo de inundación al establecer los criterios de clasificación del suelo. Así, por ejemplo, la Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje de la Comunidad valenciana establece unos criterios generales de ordenación de los recursos hídricos en el territorio, vinculantes para el planeamiento territorial y urbanístico, entre ellos el de evitar "los nuevos desarrollos en las zonas de riesgo de inundación significativo, salvo que, a falta de alternativas de localización, puedan implementarse medidas correctoras suficientes y se evite el incremento del riesgo de inundación a terceros" (art. 9.f). La citada Ley dispone la clasificación como no urbanizables de los terrenos que zonifique como zonas rurales, a saber, los suelos en situación básica rural y que, de acuerdo con el plan, mantengan los valores y funciones que desempeñen (art. 28.2). Se distingue entre el suelo rural común y el de protección especial, encuadrándose en esta última categoría, entre otros, los suelos afectados por riesgos naturales, que se regirán por la legislación sectorial correspondiente, "sin perjuicio de establecer disposiciones normativas y zonificaciones que mejoren su protección y gestión" (art. 26.c). A este respecto, conviene recordar la consolidada doctrina jurisprudencial según la cual la clasificación del suelo como no urbanizable (o rústico) protegido no es discrecional sino reglada[11].

[10] Decisión nº1313/2013/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de diciembre de 2013, relativa a un Mecanismo de Protección Civil de la Unión.

[11] Así, la STS de 18 de febrero de 2015, recurso de casación núm. 672/2013, en relación con el DPH y sus zonas de servidumbre y protección y, en general, los terrenos calificados "de protección de aguas" conforme a la legislación autonómica (FD 6).

Existe un instrumento de ordenación territorial específico con vocación de armonizar las diversas perspectivas concurrentes: el Plan de Acción Territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA). El primer PATRICOVA se aprobó en 2003, en virtud de lo previsto en la Estrategia Territorial de la Comunidad valenciana (Directriz 66: Planificación sobre riesgos territoriales naturales e inducidos). El segundo se aprobó por Decreto 201/2015, de 29 de octubre con la finalidad de adaptarse a la Directiva de Inundaciones y su transposición a la legislación estatal mediante el RD 903/2010.

La normativa del PATRICOVA distingue seis niveles de peligrosidad de inundación, basados en el periodo de retorno (comprendido entre 25 y 500 años) y el calado máximo generalizado alcanzado por el agua (art. 8.1). Para la concreción del riesgo de inundación la Conselleria competente en materia de ordenación del territorio deberá aprobar los correspondientes estudios de inundabilidad, previo informe del Organismo de Cuenca (art. 13). Se plantea así una evidente duplicidad entre estos estudios y los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación elaborados por las Demarcaciones Hidrográficas. La normativa del PATRICOVA se limita a decir que ambas series cartográficas "serán complementarias, en consideración a las diferentes metodologías empleadas en su elaboración, siendo elementos esenciales para la determinación de la problemática de inundación en el territorio" (art. 7). Se persigue la coordinación entre ambas Administraciones, la hidráulica y la territorial[12]. En caso de contradicción entre estudios, prevalecerá lo señalado en los desarrollados a mayor escala, siempre que los mismos se hubiesen realizado con similar nivel de rigurosidad (art. 10.3). Pero lo relevante es la prevalencia de los estudios de inundabilidad del PATRICOVA para delimitar en el planeamiento territorial y urbanístico las zonas inundables[13].

A la vista de esta regulación, en muchos aspectos encomiable y pionera, se suscita la duda de si está justificada la duplicidad de líneas de actuación para identificar las zonas inundables y no sería deseable aunar esfuerzos (y recursos) para identificarlas.
Lo que no se puede negar es el firme propósito de que en el planeamiento territorial y en el urbanístico de ordenación estructural conste la zonificación resultante de la legislación de aguas. En concreto, deberán reflejar (art. 16 de la normativa del PATRICOVA):

a) La red fluvial, incluyendo el DPH y sus zonas de servidumbre y de policía, allí donde hayan sido delimitados por el Organismo de Cuenca.
b) Las zonas de peligrosidad de inundación definidas de acuerdo con el artículo 10 de esta normativa.
c) Las zonas de flujo preferente de todos los cauces del municipio, o, al menos, de los incluidos en el suelo urbano y urbanizable.

También se determina la clasificación del suelo en dichas zonas: se clasificará como SNU de especial protección el DPH, así como las zonas de peligrosidad de inundación de nivel 1 delimitadas en el PATRICOVA, salvo aquéllas que estén clasificadas como suelo urbano, que se calificarán, respectivamente, como DPH o como protección hidráulica (art. 17.1 de la normativa del PATRICOVA)[14]. El SNU afectado por peligrosidad de inundación no podrá ser objeto de

[12] Art. 10.2: "Para determinar la equivalencia entre los mapas de peligrosidad de inundación, de las Demarcaciones Hidrográficas, y los niveles de peligrosidad de inundación definidos en el artículo 8, en primera instancia se recabarán de las Demarcaciones Hidrográficas los parámetros que permitan efectuar esa equivalencia y, a falta de ellos, se adoptarán los criterios de equivalencia más conformes con el principio de precaución: intervalos de calados más desfavorables o periodos de retorno más largos".
[13] "La delimitación concreta de las zonas inundables y niveles de peligrosidad de inundación a ellas asociados es la que se contiene en los Planos de Ordenación del PATRICOVA; no obstante, esta delimitación puede modificarse en los términos establecidos en la presente Normativa" (art. 8.2).
[14] Art. 17.2: "En estas zonas se prohíbe cualquier tipo de edificación, salvo las previstas expresamente en el planeamiento

reclasificación como suelo urbano o suelo urbanizable, excepto en los municipios con elevada peligrosidad de inundación (art. 18)[15]. En estos suelos el Plan establece importantes limitaciones de uso. También en los suelos urbanizables que no cuenten con programa de actuación integrada aprobado definitivamente (art. 19), así como en suelo urbano y urbanizable con programa de actuación integrada aprobado (art. 20). Sobre ello habremos de volver (infra 4).

El ejemplo del PATRICOVA tiene interés en cuanto pone de relieve que no se puede aplicar al pie de la letra la regla del art. 21.2.a. del TRLSRU, según el cual estarán en la situación básica de suelo rural los terrenos "con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación o de otros accidentes graves". Hay zonas inundables clasificadas como suelo urbano e, incluso, suelos no urbanizables que pueden ser reclasificados como urbanos en municipios con elevada peligrosidad de inundación, como acabamos de ver.

Pese a la rotunda afirmación de la "Guía Técnica de apoyo a la aplicación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial"[16], la identidad no es absoluta, porque no todas las zonas inundables están en la situación básica de suelo rural, aunque debieran estarlo. Así lo ha puesto de relieve la doctrina[17]. En mi opinión, hay que entender que el art. 21.2.a) del TRLSRU marca un objetivo a perseguir (un "deber ser"), pero que no coincide todavía en bastantes casos con la realidad. No se olvide que el suelo urbano se determina por la realidad (la "facticidad", como le gusta decir al Tribunal Supremo). Lo será si reúne los requisitos legales determinantes de esa clasificación (urbanización o edificación consolidada), aunque sea inundable.

Cuestión distinta es que, en función de las circunstancias, se deba plantear la adopción de las medidas precisas para prevenir las inundaciones o el traslado de la población.

5. COMENTARIO FINAL

La delimitación de las zonas inundables se hará en los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación, que forman parte del contenido de los PGRI y que integran el SNCZI. Este sistema cartográfico debe ser el marco de referencia para la coordinación interadministrativa[18] La ordenación territorial y urbanística deberá reflejar esa delimitación, aunque pueda establecer una cartografía más detallada. En la Comunidad valenciana hay una duplicidad de instrumentos, que, sin duda, tiene una explicación en su origen, pero que debería reconducirse en un intento de aunar esfuerzos.

---

territorial y urbanístico aprobado a la entrada en vigor del PATRICOVA. Asimismo, se prohíbe la realización de obras de infraestructuras que sean vulnerables o puedan modificar negativamente el proceso de inundación". Lo cita también IGLESIAS GONZÁLEZ F., 2019, p. 32.

[15] "Se consideran municipios con elevada peligrosidad de inundación aquellos en los que, al menos, las dos terceras partes (2/3) de su término municipal están afectadas por la peligrosidad de inundación de niveles 1 a 6, o bien aquellos otros que, aun no cumpliendo la condición anterior, tienen fuertes limitaciones para orientar sus futuros desarrollos hacia zonas no inundables, por la morfología de su territorio" (art. 15 párrafo 1º). La relación de esos municipios se contiene en las disposiciones adicionales primera y segunda.

[16] "La redacción del artículo 21 del texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana produce una absoluta identidad entre los suelos que para el legislador estatal están en la situación de urbanizados, y los suelos que la legislación urbanística autonómica define como suelos urbanos. Es decir, la definición de suelo en situación básica de urbanizado encaja, con la definición de suelo urbano (tanto consolidado como no consolidado) que contienen todas las leyes urbanísticas de las Comunidades Autónomas".

[17] Del art. 21.2.a) TRLSRU "no resulta claro si los terrenos afectados por protección o policía del dominio público o los sujetos a riesgos de inundación deben ser considerados (necesariamente) como terrenos en situación de suelo rural" (IGLESIAS GONZALEZ, 2019, p. 28). ESCARTÍN ESCUDÉ cuestiona que todos los terrenos del art. 21 TRLSRU estén en la situación de rural, si bien sostiene que los tres supuestos que distingue deberían clasificarse como SNU (2017, p. 93-94).

[18] Así lo señala ESCARTÍN ESCUDÉ, 2017, p. 91.

Según el TRLSRU las zonas inundables están en la situación básica de suelo rural, por lo que se deberían clasificar como suelo no urbanizable (o rústico) de especial protección, salvo que se adopten las medidas necesarias para prevenir el riesgo de inundación. Los PGRI "reconocerán" el carácter rural de esos suelos. Sin embargo, en la realidad no es así siempre, pues hay zonas inundables clasificadas como suelo urbano e, incluso (y esto ya es más que discutible) la posibilidad de reclasificar como urbanos suelos no urbanizables.

Los PGRI pueden imponer limitaciones al uso del suelo en las zonas inundables. Sin embargo, los planes actuales no han hecho uso de esa posibilidad, sino que se remiten a las establecidas en los PHD o en la legislación de aguas (RDPH), seguramente porque no tienen carácter normativo. La paradoja es que los PHD se remiten a los PGRI, cuando, en puridad son ellos los que imponen las limitaciones de uso.

En la Comunidad valenciana, no hay problemas de articulación entre el PATRICOVA y los PGRI, puesto que estos no son normativos. Podría haberlos entre aquel y los PHD si hubiera contradicciones entre sus respectivas normativas. En la Demarcación del Segura el contenido de ambos planes es muy semejante, por lo que no parecen existir contradicciones. Ambos instrumentos prohíben con carácter general nuevos desarrollos urbanísticos en las zonas inundables y establecen prohibiciones y limitaciones de uso, que han sido explicados en la Ponencia, a la que complementa esta Comunicación.

REFERENCIAS

- Diez Herrero, A. (2017). Mapas de peligrosidad y riesgo por inundaciones: implicaciones técnicas y jurídicas. En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: Una perspectiva interdisciplinar*, 165 y ss. Dykinson.
- Escartín Escudé, V. (2017). Sobre la ordenación urbanística de los terrenos inundables tras la aprobación del Real Decreto 638/2016. En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: Una perspectiva interdisciplinar*, 83 y ss. Dykinson.
- Iglesias González, F. (2019). La ordenación urbanística de los terrenos inundables, *RDUMA*, 329, 19 y ss.
- López De Castro García-Morato, L. (2011). La protección civil ante la prevención y gestión del riesgo de inundaciones. En: A. Menéndez Rexach (Dir.), *Protección civil y emergencias: régimen jurídico*, 249 y ss. La Ley.
- Llasat Botija, M. C. (2017). La gestión del riesgo de inundaciones. En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: Una perspectiva interdisciplinar*, 203 y ss. Dykinson.
- Menéndez Rexach A. (2016). El derecho de aguas ante las situaciones hidrológicas extremas: inundaciones y sequías. En: T. M. Navarro Caballero (Dir.), *Desafíos del Derecho de Aguas*, p. 85 y ss. Thomson Reuters Aranzadi, Cizur Menor.

PARTICULARIDADES DE LA PERIURBANIZACIÓN EN EL LITORAL MEDITERRÁNEO COMO CONDICIONANTE DEL RIESGO DE INUNDABILIDAD

Antonio Gallegos Reina
Universidad de Málaga, España
a.gallegos@uma.es
http://orcid.org/0000-0002-2711-111x

RESUMEN

El litoral mediterráneo español en la actualidad se presenta como un continuo urbano en la práctica totalidad de su territorio, resultando las áreas periurbanas un nexo de este continuo en los espacios intersticiales. La importancia de este fenómeno en la ordenación y gestión territorial es capital por su papel como espacio causante y receptor de riesgos naturales. Las particularidades de la periurbanización hacen que estos territorios sean aún más frágiles frente a la inundación de lo que ya de por sí es la propia región mediterránea. En este texto se analizan de manera introductoria dichas particularidades, así como la imbricación que existe entre las cuencas fluviales periurbanas y la inundabilidad. La metodología atiende a la evaluación de las razones de la periurbanización, las características y usos habituales, la complejidad de su patrón característico y las tensiones territoriales generadas. Y concluye como resultado con la repercusión que este modelo urbanístico tiene en la inundabilidad. Además, también se pone de relevancia la fuerte componente territorial de los riesgos naturales, con una percepción alejada del análisis sectorial con que se afrontan en la actualidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los espacios periurbanos tienen una importancia cuantitativa y cualitativa destacable en el ámbito litoral mediterráneo. La importancia cuantitativa queda patente considerando su elevada representatividad superficial en el ámbito geográfico considerado, y la cualitativa por la importancia económica y estratégica en el contexto de la región (Gallegos, 2019, JRC, 2017, García García, 2017). El desarrollismo urbanístico en las últimas décadas en la costa mediterránea ha configurado espacios con rasgos originales respecto a las tipologías rural y urbana existentes hasta entonces, además de haber complicado notablemente los procesos territoriales que ya previamente se daban lugar en ellos por las propias particularidades físicas de la región. Ante esta situación, nos hemos encontrado con carencias en los métodos usados actualmente desde la geología, ingeniería o geografía para hacer frente a su análisis e interpretación. Es necesario, pues, perfilar nuevos enfoques que permitan entender y actuar frente a estas nuevas realidades espaciales. En este sentido, Perles (2010), propone identificar unidades de terreno con comportamiento homogéneo e identificar los factores en su interior, partiendo de una concepción del riesgo como fenómeno territorial, en el que los impactos son consecuencias de las interrelaciones espaciales y temporales entre los distintos elementos y factores que componen el territorio, sean éstos de carácter natural o humano.

Para abordar las particularidades de la inundabilidad en espacios periurbanos es necesario un análisis previo de las características de estos espacios. Desde la Geografía se han realizado numerosas aportaciones al concepto de áreas periurbanas, con gran diversidad de enfoques y terminologías propuestas: áreas de influencia, hinterland, umland, áreas periurbanas, rururbanas, banlieues, rural urbanizado, etcétera (González Urrela, 1987).

1. MODALIDADES DE LA PERIURBANIZACIÓN

El proceso de periurbanización puede deberse tanto a que la ciudad, en su crecimiento, llega hasta un sitio determinado, por mera expansión urbanística no concentrada, o bien a que la ciudad aparece en ese sitio determinado. En este segundo caso se debe a la mejora de la imagen de las periferias urbanas, que dejan de ser lugares de exclusión social y alcanzan dinamismo socioeconómico propio, poniéndose en valor el contacto con la naturaleza y cierto aislamiento voluntario frente la ciudad (Mérida, 1994).

Esta revalorización de los espacios periurbanos y el crecimiento disperso es común a mayor o menor intensidad en toda Europa. Poco a poco se está rompiendo la tradicional dicotomía entre el campo y la ciudad, con la creciente aparición y expansión de las áreas periurbanas y la urbanización dispersa. La razón principal puede estar en la desaparición de la concepción centralista de la ciudad en el presente contexto de globalización (Entrena, 2005).

La formación de áreas periurbanas puede dividirse en los siguientes modelos (Zárate, 1984): desarrollo discontinuo (la franja periurbana surge en torno a la ciudad central, de manera regular, dando origen a un área de baja densidad de población), desarrollo radial (el crecimiento tiene lugar a lo largo de las principales vías de comunicación y de forma segmentada) y desarrollo a saltos (el espacio periurbano se compone de núcleos de usos de suelo urbano en medio de territorios cuya función era exclusivamente rural).

El desarrollo, en cualquiera de los tres tipos, raramente responde a modelos proyectados previamente. Las grandes actividades periurbanas planificadas apenas suponen un 2% en número y un 25% en superficie del total del fenómeno periurbano (Abadía, 2002), resultando el grueso de la ocupación de suelo por mero avance urbanístico y sin planificación o normativa adecuada, normalmente asimilándolo inadecuadamente a la ya existente.

Las causas de la expansión urbanística con el nuevo modelo desconcentrado pueden ser muy subjetivas, y variables según la región, pero en líneas generales podrían responder a lo siguiente:

i. El interés de la población por residir en un ambiente más tranquilo y con mayor calidad medioambiental.
ii. La necesidad de acceder a viviendas más económicas.
iii. El interés de las administraciones locales por rentabilizar económicamente el suelo periurbano, clasificándolo como urbano, en lugar de darle otro uso de mayor interés social o funcional, pero de menor valor económico.
iv. El desarrollo de las infraestructuras en una región donde el turismo y el desarrollo residencial casi han fagocitado los sectores primario y secundario, y más concretamente el avance de las vías de comunicación y el transporte privado frente al transporte público.
v. El desarrollo de internet, que posibilita romper la dependencia de los centros urbanos tanto en aspectos laborales como administrativos, y cada vez en muchos otros, como los comerciales o culturales.

2. ESPACIOS MULTIFUNCIONALES Y EN CONFLICTO. LA INFLUENCIA DEL ACTUAL MODELO ECONÓMICO

Con todo lo anterior, pasamos de la ciudad compacta a lo que algunos autores llaman “ciudad dispersa”, en la que las zonas rurales son ocupadas por población generalmente desligada de estas áreas, que desconocen su funcionamiento y sus valores reales. Con esta ciudad dispersa se aumenta la imbricación entre dos realidades antes claramente diferenciadas, y aparecen espacios multifuncionales sometidos a grandes y rápidas transformaciones. En estos espacios

multifuncionales, además de mantenerse los usos agrarios y aparecer los residenciales, se suman muchos otros, como los de ocio, infraestructuras o industriales (Gallegos & Perles, 2019). Con frecuencia, se producen tensiones a la hora de decidir estos usos, enfrentándose el interés de la población por disfrutar del valor ambiental de estos espacios y el interés meramente económico, o incluso especulativo, de inversores, promotores y ayuntamientos. Para superarlas es importante tomar una actitud firmemente comprometida con la ordenación del territorio, basando la elección del aprovechamiento en función de las particularidades ambientales, históricas y culturales de cada espacio. Algunos criterios a considerar podrían ser estos, tomados de la Comisión Europea (The Study Programme on European Spatial Planning, 2000):

i. La posición geográfica, o la localización espacial de una cierta zona periurbana.
ii. La resistencia económica, o la relativa relevancia económica de esa zona periurbana con respecto a otras.
iii. Las ventajas naturales, o la importancia, sensibilidad, extensión o peculiaridad de los ecosistemas y otras áreas naturales.
iv. Las ventajas culturales, o las características del paisaje y los bienes culturales antiguos y modernos.
v. La integración social, o el nivel de interacción entre los grupos sociales en cada zona y entre diferentes zonas.
vi. La presión sobre el uso de la tierra, o la probabilidad de conflictos de intereses entre diferentes tipos de usos del suelo.

Junto a lo anterior, debemos tener presente que la ocupación en los espacios periurbanos responde a una serie de características que no hacen sino abrir la definición de estas zonas, aumentando una complejidad que paralela y necesariamente hace más complicado su análisis y su gestión (ver figura 1). Esta complejidad dificulta la descripción desde sus particularidades funcionales o morfológicas, y nos lleva necesariamente a la necesidad de acudir a un marco teórico más amplio, que incluya otros aspectos, como las relaciones y dependencias que existen entre los espacios periurbanos y los ámbitos rural y urbano. De igual modo, se deben tener en cuenta condicionantes económicos, como el modelo territorial impuesto por el capital. Lipietz ya citaba en los años setenta: “el proceso de urbanización, tal y como se plantea en la actualidad, no es un proceso ineluctable, una ley de evolución necesaria ligada al desarrollo en abstracto, sino el modelo territorial impuesto por el capital” (Lipietz, 1977). Pero esta realidad es ahora, coincidiendo con el mayor grado de desarrollo y atrofia del capitalismo, cuando más vigente se hace.



Figura 1. Imagen de un área periurbana en el municipio de Estepona (Málaga), en la que puede apreciarse la compleja mezcla de aprovechamientos. Entre otros, encontramos una estación eléctrica, almacenes, depósitos, centros educativos, usos forestales y explotaciones agrícolas en uso y abandono. Fuente: Google Earth.

Partiendo de la ciudad, como foco económico, social y territorial, las áreas periurbanas son el inmediato exponente de la integración del espacio rural según el funcionamiento del sistema capitalista. Se trata de procesos rápidos y agresivos con el territorio, que responden a la eliminación y absorción de los modos de producción tradicionales por el sistema desarrollista, intenso consumidor de recursos y de suelo (González Urrela, 1987). Dentro de esta consideración, se caracteriza también por la fuerte presencia de la edificación especulativa. Las expectativas de lucro los convierten también en suelo para especular, a la espera del desarrollo urbanístico o de la recalificación para dicho uso.

3. USOS PRINCIPALES DE LOS ESPACIOS PERIURBANOS

Los suelos periurbanos están en continuo cambio, con una población de baja o moderada densidad, pero con mucha movilidad, que requiere numerosas infraestructuras. Son áreas también con frecuentes espacios intersticiales, que van cayendo en el abandono, alterando la productividad de la región y desencadenando o favoreciendo procesos de pérdida de suelo, movimientos gravitatorios o inundaciones. Los usos más frecuentes son los residenciales y las infraestructuras viarias. La rápida expansión de los primeros no siempre suele ir acompañada por la adecuada dotación de servicios, y muy frecuentemente incluso se realiza fuera de ordenamiento. También suele acoger aquellas otras actividades cuyo encaje es más difícil, por impacto, espacio o coste del suelo, en áreas urbanas. En ocasiones se trata de industrias o infraestructuras energéticas o sanitarias, como estaciones eléctricas, depuradoras o vertederos, y otras veces son actividades de escaso valor añadido, como almacenes o chabolas (Verdaguer, 2010). Respecto a los aprovechamientos agro-ganaderos, a la vez que perviven algunos espacios agrarios tradicionales y explotaciones agrarias de pequeño tamaño, van apareciendo también nuevas producciones agrícolas intensivas. En cualquier caso, lo normal es que la agricultura en estos espacios se presente como algo residual, en un estadio último previo a su sustitución por otros usos más lucrativos.

En resumen, los espacios periurbanos son espacios que están en continua crisis, que deben responder a numerosas funciones. Reciben todo lo que arroja la ciudad y absorben funciones que requieren condiciones específicas, tamaño suficiente o precio reducido de suelo (Entrena, 2005). Pero, por otro

lado, también responden al creciente desarrollo de las segundas residencias y el interés ciudadano por los espacios naturales y abiertos. Y a todo esto, se suma el desarrollo de las infraestructuras, especialmente las de transportes, y la alta capacidad ingenieril de transformación territorial. Pero todas estas funcionalidades o usos han surgido de manera no planificada, dando lugar a espacios muy desarticulados, con respuestas urbanísticas arbitrarias, en el mejor de los casos, o que responden a intereses meramente económicos. La insuficiente regulación legal de estos espacios y su menor control urbanístico por parte de la administración suponen la aparición de aprovechamientos no regulados ni por la normativa urbana ni por la del suelo no urbanizable, así como procesos de especulación económica o, en términos generales, casuísticas de peligrosidad e incremento de la vulnerabilidad que no han sido reguladas previamente.

4. CARACTERIZACIÓN DE LA INUNDABILIDAD EN ESPACIOS PERIURBANOS

Considerando lo anterior, pueden extraerse algunos factores y condicionantes que hacen de las áreas periurbanas un espacio especialmente frágil frente al riesgo de inundación, tales como la elevada incorporación de elementos sólidos -antrópicos o naturales- al flujo, la imprevisión en la urbanización y su gestión hidráulica o ambiental, el frecuente reajuste de equilibrios territoriales en las cuencas, la existencia de numerosas y variables líneas de fricción y contacto entre espacios naturales y humanos, la aparición desproporcionada de infraestructuras lineales (viarias, hidráulicas o energéticas), la ocupación de territorios con escasa capacidad de acogida, la localización de viviendas y edificaciones precarias en zonas de peligro o la frecuente alteración de la geomorfología original y la creación de neorrelieves.

Todo ello da lugar a modificaciones del coeficiente de escorrentía y del tiempo de concentración en las cuencas, por impermeabilización de suelos, eliminación de zonas de laminación de avenidas, deforestación, creación de redes de alcantarillado o derivaciones de cauces (Segura Beltrán et al., 2002, Borras et al., 2006), así como alteraciones directas o indirectas de la sección transversal y longitudinal de los cauces. Resultado de esto no solo se obtienen caudales punta mayores y con tiempo de concentración más bajos, sino que también se limita la disipación de energía y se incrementa la velocidad y densidad del flujo, aumentando con ello la peligrosidad y activando peligrosidades asociadas como la zapa de márgenes o los deslizamientos de laderas adyacentes al cauce. De igual modo, se cambia el lugar en que actúa la peligrosidad, frecuentemente desplazándola aguas debajo de donde se han modificado los sistemas anteriores de equilibrio.

5. CONCLUSIÓN: LAS CUENCAS FLUVIALES PERIURBANAS COMO ESPACIO DE RIESGO

Aún con mayor importancia que en los ámbitos urbano y rural, es en la zona periurbana donde más hay que avanzar en la prevención de riesgos naturales y la gestión de la inundabilidad, por sus mayores impactos y el valor estratégico de estos territorios. Es aquí donde se localizan los mayores conflictos y problemas de naturaleza física y de gestión urbanística y administrativa. Se trata sin duda de laboratorios donde aparecen la práctica totalidad de los procesos territoriales contemporáneos (González Urrela, 1987). Pero más allá de todo eso, son espacios donde la componente territorial alcanza un significado más evidente. Esto es una dificultad para su gestión, pues requiere una visión sistémica que dificulta su análisis, pero se convierte de igual modo en una oportunidad para introducir el análisis holístico y sintético frente al análisis sectorizado tradicional en el estudio de la inundabilidad.

Al respecto, la Geografía viene trabajando en la importancia de adaptar las estrategias de análisis y gestión del riesgo a las particularidades del espacio en el que éste se produce. Esta perspectiva es recogida, entre otros autores, por trabajos recientes de Perles et al. (2006, 2007, 2010). En éstos se

reflexiona sobre el hecho de que los impactos son consecuencia de las interrelaciones espaciales y temporales entre los distintos elementos y factores, naturales o antrópicos, que componen el territorio, y sobre la necesidad de adaptar las metodologías de análisis del riesgo en estos espacios singulares por su carácter complejo y dinámico. Su interés radica tanto en la importancia económica y estructural de estos suelos como en los cambios y conflictos que en ellos tienen lugar, y, en resumen, en la oportunidad que nos brindan para la gestión preventiva mediante la ordenación territorial.

Diversos autores inciden en que la existencia de peligrosidades naturales y las interrelaciones entre ellos y con el patrón humano funcional en el que se desarrollan, particularizan espacios de sensibilidad específica frente al riesgo (Calvo, 2001), añadiendo que más allá del estudio individualizado del lugar de riesgo debemos aspirar a caracterizar y modelizar patrones y dinámicas territoriales de comportamiento equivalente frente al riesgo (Perles y Mérida, 2010).

Asumir esta fuerte componente territorial de la inundabilidad implica reconocer la existencia de una serie de procesos subyacentes, frecuentemente no explícitos, dependientes del modelo urbanístico e incluso de los condicionantes de la gestión administrativa regional. Implica asimismo asumir una serie de relaciones entre las variables físicas y antrópicas complejas, que además fluctúan en el tiempo. Resulta innegable que esto difícilmente será una buena carta de presentación para que las administraciones competentes quieran abordar el análisis y gestión de las inundaciones en estos espacios, pero no por ello podrá obviarse que éstas tienen un comportamiento claramente sistémico y que precisan de un enfoque holístico y específico para este territorio.

A la vista de todo lo anterior, debe concluirse que las áreas periurbanas del frente litoral mediterráneo son espacios complejos, en los que los equilibrios naturales sufren sus primeras alteraciones en el proceso de antropización del territorio. El comportamiento sistémico de la cuenca fluvial debe readaptarse a una serie de particularidades, que más allá de las propias de la cuenca fluvial responden también a su condición de litoral mediterráneo y de área periurbana.

Entre dichas particularidades destacan, en tanto que son espacios mediterráneos, la torrencialidad pluviométrica, la intensidad de los aprovechamientos agrarios históricos en laderas, la alta producción de residuos vegetales por esos mismos aprovechamientos o los exigentes requisitos de las nuevas agriculturas intensivas. Por su condición litoral, con disposición geomorfológica de franjas montañosas muy próximas al mar, destacan la alta susceptibilidad a los movimientos en masa, la alta producción de residuos sólidos por erosión y la elevada tasa de transformación de la pluviometría en escorrentía. Y por su condición de espacios periurbanos, la intensa, acelerada y desordenada evolución de población, poblamiento y usos del suelo.

La unión de los tres sistemas, cada uno con sus propias morfologías y dinámicas funcionales, generan un espacio problemático, pero del que igualmente pueden desprenderse unas características comunes que singularizan el comportamiento de la inundación. El conocimiento de todas estas singularidades es fundamental para mejorar la predicción de áreas inundables. Por otro lado, la gestión del riesgo en estos espacios es muy dispar, por duplicidad de competencias o vacíos normativos. Pero precisamente por ello, existe un interés añadido, derivado de que sean espacios aún por definir normativa y administrativamente, sobre los que se puede legislar y ordenar, y con potencialidades que aún pueden y deben preservarse.

REFERENCIAS

- Abadía Pérez, J. (2002). *El fenómeno periurbano: caracterización y propuesta de regulación en el marco del Área Metropolitana de Barcelona*. Projecte o tesina d'especialitat. Escola técnica superior de'enginyers de camins, canals i ports de Barcelona.

- Calvo García-Tornel, F. (2001). *Sociedades y territorios en riesgo*. Ediciones del Serbal, Barcelona.
- Entrena Durán, F. (2005). Procesos de periurbanización y cambios en los modelos de ciudad. Un estudio europeo de casos sobre sus causas y consecuencias. *Papers,* 78, 59-88.
- Gallegos Reina, A. (2019). Litoralización, urbanización difusa y riesgos naturales: análisis y reflexión sobre la evolución del poblamiento en el litoral mediterráneo andaluz entre 1957 y 2016. In *Planificación y gestión integrada como respuesta*, 251-256. Actas del IX Congreso Internacional de Ordenación del Territorio. Cantabria, 2019. Disponible en:
- https://www.researchgate.net/publication/331895142_Litoralizacion_urbanizacion_difusa_y_riesgos_naturales_analisis_y_reflexion_sobre_la_evolucion_del_poblamiento_en_el_litoral_mediterraneo_andaluz_entre_1957_y_2016
- Gallegos Reina, A. & Perles Roselló, M.J. (2019). Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 81, 2740, 1–38. http://dx.doi.org/10.21138/bage.2740
- García García, M. (2017). El litoral español: más de un cuarto de siglo a la deriva. *Zarch,* 8, 273-287.
- González Urruela, E. (1987). La evolución de los estudios sobre áreas periurbanas. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 7.
- JRC (2017): *Atlas of the Human Planet 2017.* Global Exposure to Natural Hazards. European Commission, DG Join Research Center, Ispra.
- Lipietz, A. (1977). *El capital y su espacio*, 203 p. Ed. Siglo XXI, Madrid.
- Mérida Rodríguez, M. (1994). *El monte San Antón (Málaga). Análisis de un espacio natural periurbano*. Textos mínimos. Universidad de Málaga, Málaga.
- Perles Roselló, M.J. (2010). Apuntes para la evaluación de la vulnerabilidad social frente al riesgo de inundación. *Baética, 32*, 67-87.
- Perles Roselló, M.J. & Cantarero Prados, F. (2007). Particularidades de la generación del riesgo en espacios periurbanos. *Baética,* 29, 145-153.
- Perles Roselló, M.J. & Cantarero Prados, F. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio. Propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-peligros. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52, 245-271.
- Perles Roselló, M.J. & Mérida Rodríguez, M. (2010). Patrón territorial y conformación del riesgo en espacios periurbanos. El caso de la periferia Este de la ciudad de Málaga. *Scripta Nova,* XVI, 329.
- Perles Roselló, M.J., Gallegos Reina, A. & Cantarero Prados, F. (2006). Análisis del ajuste del área inundable obtenida mediante una evaluación integrada de la peligrosidad de inundación y peligros asociados. *Baética*, 28, 527-545.
- Verdaguer Viana-Cárdenas, C. (2010). *La agricultura periurbana como factor de sostenibilidad urbano-territorial. Conclusiones preliminares del estudio de casos desde la perspectiva del planeamiento urbanístico.* Universidad politécnica de Madrid, Madrid.
- Zárate, A. (1984). *El mosaico urbano: organización interna y vida en las ciudades*. Ed. Cincel, Cuadernos de Estudio, Madrid.

LA CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD COMO BASE DE LOS PLANES DE EMERGENCIA: ANÁLISIS-DIAGNÓSTICO DEL TÉRMINO MUNICIPAL DE DAYA VIEJA (ALICANTE)

Antonio Oliva Cañizares
antoniogeografia1@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-6222-5852

Alejandro Sainz-Pardo Trujillo
alsainzpardo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-0982-5466

Esther Sánchez Almodóvar
esther.sanchez@ua.es
https://orcid.org/0000-0003-4201-0779

Universidad de Alicante, España

RESUMEN

La presente investigación recoge un análisis-diagnóstico del municipio alicantino de Daya Vieja, localizado en la Vega Baja del Segura, tras las inundaciones de septiembre de 2019. Se ha llevado a cabo la elaboración de una serie de mapas temáticos cuyo resultado final es un mapa de vulnerabilidad. En éste se muestra que dicho municipio presenta una vulnerabilidad elevada ante las inundaciones. Asimismo, los mapas obtenidos sientan las bases de lo que podría ser un Plan de Emergencias a escala municipal, cuya metodología podría aplicarse al resto de municipios, además de servir a los cuerpos de emergencia. Por último, se realiza una serie de propuestas para reducir o paliar los efectos negativos de las inundaciones.

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XX, la ONU, en la declaración de la *Década Internacional para la reducción de Desastres Naturales (1990-1999)*, define los conceptos de riesgo natural, peligrosidad y vulnerabilidad, siendo esta última definida como "*el grado de tolerancia social, económica y tecnológica de la población expuesta a dicho peligro, así como su capacidad de reacción y adaptación al fenómeno adverso*". A consecuencia de ello, la ONU, en la *Estrategia Internacional para la Reducción de los Riesgos Naturales*, hace visible la necesidad de incluir el factor de vulnerabilidad en los estudios de riesgos, creándose el Marco de Acción de Hyogo 2005-2015, que recoge el compromiso mundial en la toma de medidas para reducir la vulnerabilidad frente a riesgos naturales (Camarasa Belmonte & Soriano García, 2008). Como señalan algunos autores, los estudios existentes han centrado su enfoque exclusivamente en la peligrosidad, dejando a la vulnerabilidad en un segundo plano (Olcina Cantos, 2006; Pérez-Morales et al. 2016). No obstante, en la última década del presente siglo, han incrementado el número de publicaciones y trabajos de investigación centrados en dicho elemento.

Con la aprobación de la Directiva 60/2007/CE sobre la evaluación y gestión de las inundaciones, se señala que éstas son inevitables y que las soluciones tienen que plantearse desde la gestión de las mismas, con el propósito de paliar o reducir los efectos perniciosos de las inundaciones. Estas medidas se basan, principalmente, en la ordenación del territorio, en una mayor coordinación y cooperatividad entre las administraciones, elaboración de cartografía de riesgos naturales y la elaboración de planes de gestión de emergencias. Por ende, se evidencia, desde una visión europea que, la cartografía de riesgo (peligrosidad * vulnerabilidad) juega un papel fundamental de cara a la prevención de los peligros naturales en el territorio (Olcina Cantos & Oliva Cañizares, 2020). Todas estas cuestiones indican la importancia de la elaboración de cartografía de riesgo, como una de las medidas de prevención y gestión para las inundaciones, ya que, a raíz de los mapas obtenidos, se pueden regular los usos en un espacio inundable.

En consecuencia, la cartografía de vulnerabilidad puede -y debe- servir como base de los Planes de Emergencia, desde la escala local hasta la regional. Es por ello que, la presente investigación, pretende, por medio de un caso práctico, demostrar la aplicabilidad de dichos mapas, no sólo como uno de los pilares fundamentales de los planes de emergencia, sino como una herramienta que permita gestionar la misma. Los resultados que se obtienen podrían: por un lado, establecer las directrices de actuación para los habitantes de un municipio y, de otro lado, servir a los equipos de emergencia para acceder de manera rápida y segura a los municipios para ofrecer su ayuda, siendo más eficaces.

Atendiendo a todas estas consideraciones, la zona de estudio que se ha escogido para el análisis-diagnóstico a realizar, y como caso práctico de la metodología establecida, ha sido el reducido término municipal de Daya Vieja, ubicado en la llanura de inundación de la margen izquierda del río Segura.

La población de Daya Vieja, formada por 690 habitantes (INE, 2019), ocupa una pequeña porción de la margen izquierda de la llanura aluvial del río Segura. Gran parte de la llanura de inundación se encuentra por debajo de la isohipsa de 10 m, espacio conocido como el antiguo *Sinus Ilicitanus* caracterizado por haber sido un antiguo espacio lacustre. Dicha laguna se prolongaba hacia el interior por el Hondo, demarcación de las Pías Fundaciones y saladares de Albatera (Gil Olcina & Canales Martínez, 2007).

Este humedal fue rellenado de forma continua por los sedimentos aportados por las avenidas y procesos de convergencia del río Segura, río Vinalopó, ramblas y glacis próximos. Además, la actuación antrópica en labores de evacuación y drenaje de las aguas han permitido el aprovechamiento agrícola de los terrenos saneados, en la cual la empresa de desecación llevada a cabo por el Cardenal Belluga jugó un papel fundamental, puesto que el espacio que hoy en día ocupa Daya Vieja se bonificó paralelamente con las Pías Fundaciones (Box Amorós, 1985; Gil Olcina & Canales Martínez, 1989, Giménez Font, 2008).

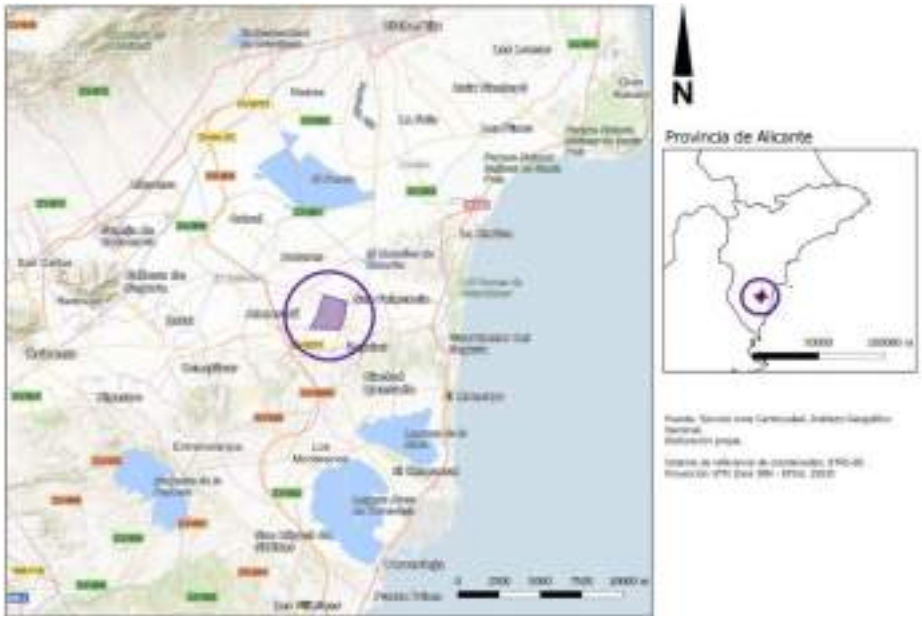


Figura 1. Localización del municipio de Daya Vieja (Alicante). Fuente: elaboración propia.

El sistema de acequias y azarbes que se distribuye por toda la Vega Baja, actúa como difusor de las inundaciones a causa de su escasa capacidad de caudal (10-15 m^3/s). Las propias lluvias *in situ*, junto con la crecida del río Segura, llegan a generar importantes problemas de anegación por desbordamiento de la red de riego afectando a los terrenos más próximos. Revisando los archivos o hemerotecas, no resulta extraño encontrar noticias que indiquen que un azarbe se ha desbordado anegando haciendas de algún término municipal de la Vega Baja. Junto a estas cuestiones, se aúnan las actuaciones antrópicas, en las cuales, los procesos urbanísticos asociados a la expansión urbana han hecho proliferar la construcción de viviendas aisladas en los espacios inundables; así como la implantación de infraestructuras de comunicación caminos o carreteras (CV-859, CV-901, CV-91 o CV-860) y la red de azarbes, especialmente el aumento de las paredes del canal del azarbe de la Reina. Estos elementos actuaron de presa o barrera, en el episodio de septiembre de 2019, ante la escorrentía producida, ya que se encuentran a cotas más elevadas que los campos de cultivo de Daya Vieja.

En lo que respecta al episodio de gota fría de septiembre de 2019, las copiosísimas precipitaciones generaron encharcamientos en Daya Vieja. Asimismo, el azarbe de la Reina se desbordó anegando gran parte del término municipal, incrementando los niveles de agua previos. El día 13, las dos roturas de las motas del río Segura en el puente de la CV-935, entre Almoradí y Algorfa, incrementaron la problemática (Biener Camacho & Prieto Cerdán, 2019; Olcina Cantos & Oliva Cañizares, 2020). La primera rotura, generó el desbordamiento del río Segura que comenzó a inundar la Vega Baja desde Almoradí hacia terrenos de menor cota: Dolores, las Dayas, San Fulgencio y Guardamar del Segura, entre otras (Minguez,2019). Cuando la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) reparó la rotura, se produjo una segunda pocos metros aguas abajo, con consecuencias idénticas que en la primera. En concreto, esta segunda rotura presentó una trayectoria más directa hacia Daya Vieja (Mínguez, 2019).
Por consiguiente, la suma de todas estas aguas acumuladas y las infraestructuras que actuaron como presas propiciaron que se produjera un embalsamiento, cuyas aguas perduraron hasta más de una semana.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo de la presente investigación se ha basado en la consulta bibliográfica de estudios científicos que abarcan cuestiones relacionadas con la cartografía de vulnerabilidad y las inundaciones. Asimismo, se ha consultado la hemeroteca del Diario Información para conocer los efectos de las inundaciones acaecidas en el episodio de gota fría o DANA de septiembre de 2019, que provocó el desbordamiento del río Segura en la Vega Baja. Posteriormente, se ha procedido a realizar una consulta bibliográfica relacionada con la zona de estudio en cuestión, para conocer su evolución y desarrollo, consecuencia directa del incremento de exposición y, por ende, de vulnerabilidad de dicha población.

Para conocer el nivel de vulnerabilidad que presentan los habitantes de Daya Vieja, se ha trabajado una cartografía temática que refleja aspectos como la altimetría, estructura viaria, presencia de viviendas y edificaciones diseminadas, y el calado de las inundaciones de septiembre de 2019. Con toda la información gráfica, donde se analizan los aspectos de exposición y peligrosidad, se ha procedido a elaborar un mapa de vulnerabilidad para el municipio de Daya Vieja sobre la base del parcelario catastral, tanto de rústica como de urbana. En definitiva, se ha identificado la vulnerabilidad de cada una de las parcelas catastrales del municipio, según los criterios trabajados y que se expresan más adelante.

Se ha realizado un mapa de altimetrías para conocer los elementos o barreras de carácter antrópico que el agua encuentra a su paso, camino hacia cotas inferiores, en el término municipal de Daya Vieja. De esta forma se puede comprender por dónde circulan los flujos de agua y qué zonas son propensas para su acumulación, recibiendo el tratamiento de zonas inundables. Para tal fin, fueron descargados, a través del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica, los puntos del vuelo LIDAR (2ª cobertura, años 2015-actualidad) correspondientes al término municipal de Daya Vieja, más una franja de doscientos metros alrededor del mismo.

A continuación, se ha confeccionado un mapa que representa la estructura urbana del término municipal, compuesta por un único núcleo urbano y viviendas o edificaciones diseminadas por el término. Se ha decidido tener en cuenta esta información dada la proliferación de viviendas diseminadas en las últimas décadas ligados a los procesos urbanísticos. Este hecho implica el incremento de la vulnerabilidad dentro del municipio, ya que aumenta la exposición en las zonas inundables que se han podido identificar de manera previa en el mapa de altimetrías. Para el reconocimiento de estas viviendas diseminadas, han sido dos las fuentes principales de consulta: por un lado, la información que proporciona el Catastro de rústica sobre los usos que tienen lugar en las parcelas catastrales del municipio; y, por otro lado, la fotointerpretación llevada a cabo con la ortofotografía aérea del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA); ortofotografías correspondientes al municipio de Daya Vieja fechadas en agosto de 2017, disponibles en el CNIG. En este segundo mapa, se ha añadido la información referente a las vías de acceso a las parcelas con viviendas diseminadas. Las vías se han clasificado de la siguiente manera, de mayor a menor importancia: 1) vías de titularidad autonómica y provincial, que representaría la red primaria de comunicación; 2) los viales del núcleo urbano, y 3) caminos que dan acceso a viviendas diseminadas.

En tercer lugar, se ha realizado la modelización hidráulica del azarbe de la Reina en todo su recorrido por el municipio. El objetivo de esta modelización es comprender el comportamiento del agua por el término municipal en caso de desbordamiento de dicho azarbe. No hay que olvidar que los primeros casos de inundación suelen deberse al efecto de las lluvias *in situ*, en relación con grandes intensidades de lluvia, que dan lugar a corte de suministros, problemas de tráfico, anegamiento de viviendas, saturación de la red de evacuación de pluviales, etc. A medida que pasa el tiempo y las

cuencas fluviales responden, los efectos se amplían, incluyendo desbordamientos fluviales, roturas de canales e inundaciones más extensas (Camarasa-Belmonte & Caballero López, 2018).

Estas cuestiones explican, en gran medida, las inundaciones de la Vega Baja del Segura en el episodio de septiembre de 2019. En este episodio se pueden identificar tres fases de inundación: (1) la lluvia *in situ* y con carácter torrencial, que descarga entre 140-150 l/m^2 en tan solo 2 horas, generando espacios encharcados; (2) el desbordamiento del azarbe de la Reina aportando más nivel de agua al municipio de Daya Vieja y; (3) Las dos roturas en las motas de encauzamiento del río Segura, que aportó grandes cantidades de caudal, incrementando el nivel de calado, inundando en gran parte la margen izquierda de la llanura de inundación, donde se ubica el área de estudio.

Esta modelización ha sido realizada con el programa HEC-RAS, en el cual se ha introducido una serie de condiciones de contorno como la rugosidad, atendiendo a los valores de Manning. En este caso se ha introducido para el azarbe de la Reina un valor de 0,025 y, para la vega 0,05; que corresponde a valores de un río y pradera, respectivamente. Posteriormente, se ha introducido un caudal de 950 m^3/s ya que el resultado que se obtiene se asemeja a los espacios inundados y los calados alcanzados en el casco urbano en el episodio de septiembre de 2019.

Con toda la información gráfica recopilada y trabajada con herramienta SIG, se han determinado cuatro niveles de vulnerabilidad, atendiendo a los criterios definidos en la siguiente tabla:

NIVEL DE VULNERABILIDAD	CRITERIO DE DEFINICIÓN
Vulnerabilidad muy alta	Parcelas rústicas que contienen edificaciones con uso residencial o industrial, donde se alcanzaron valores estimados de calado superiores a los 60 centímetros.
Vulnerabilidad alta	Parcelas rústicas carentes de edificaciones de uso residencial o industrial, y parcelas urbanas, donde se alcanzaron en ambos casos valores estimados de calado superiores a los 60 centímetros.
Vulnerabilidad media-alta	Parcelas rústicas y urbanas donde se alcanzaron valores estimados de calado superiores a los 10 centímetros e inferiores a los 60 centímetros.
Vulnerabilidad media	Parcelas rústicas y urbanas donde se alcanzaron valores estimados de calado inferiores a los 10 centímetros.

Tabla 1. Criterios de definición de los niveles de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.

La unidad básica tomada para la evaluación de la vulnerabilidad en el término municipal de Daya Vieja es la parcela catastral. De esta manera, se ha descargado, a través de la Oficina Virtual del Catastro, el parcelario rústico y urbano de Daya Vieja, con el fin de evaluar parcela por parcela su nivel de vulnerabilidad, a tenor de los criterios mostrados en la Tabla 1 y utilizando en el proceso herramienta SIG. Cabe mencionar que la evaluación de la vulnerabilidad en cada parcela comienza por una "vulnerabilidad media", dada la vulnerabilidad genérica que tiene de por sí el municipio, al ubicarse en la llanura aluvial del Segura y no poder descartar que no haya parcelas que, en un momento determinado, no se vean afectadas por una inundación, ya que cada inundación contiene un comportamiento diferente.

3. RESULTADOS

El resultado del mapa de las cotas altimétricas permite identificar las partes del término municipal que están más expuestas ante una inundación, al presentar cotas altimétricas de mayor profundidad, al mismo tiempo que, se analizan las infraestructuras que suponen un riesgo añadido por actuar de barrera frente al flujo de escorrentía (Fig.2).

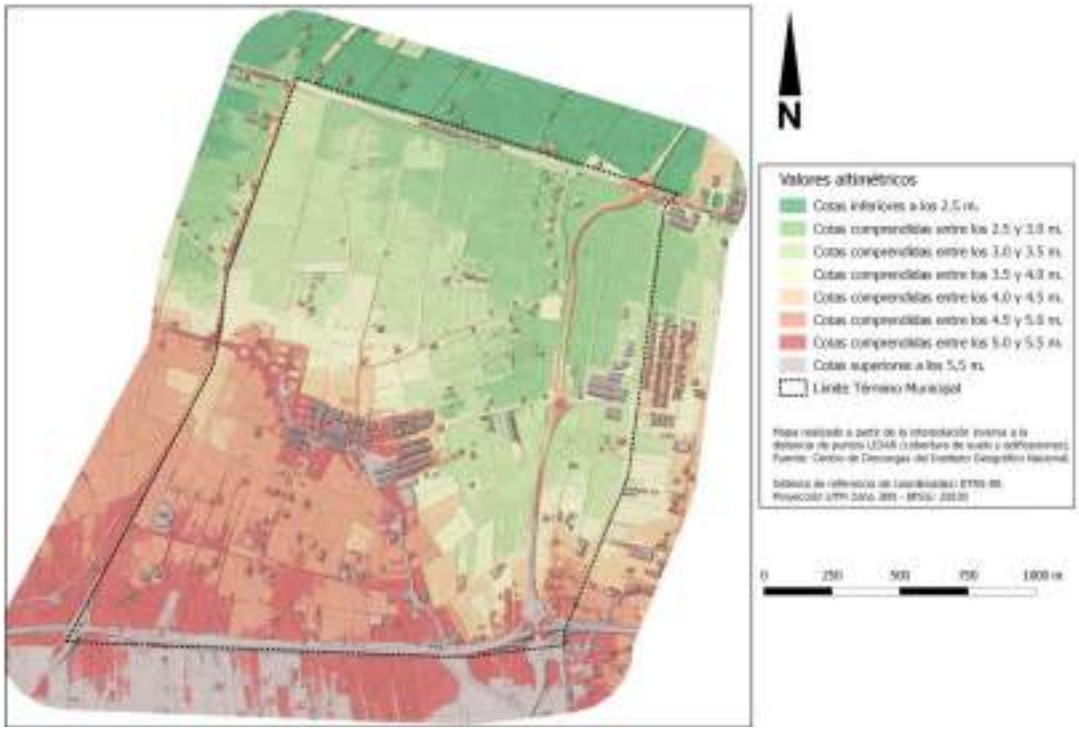


Figura 2. Altimetrías del término municipal de Daya Vieja (Alicante). Fuente: elaboración propia.

El mapa refleja las diferencias de alturas que existen en el término municipal. Como se verá más adelante, las diferencias de cotas juegan un papel fundamental para la acumulación de calados. En este caso, los espacios con menores cotas serán los que presenten un mayor calado, motivado por la planicie de este espacio y la existencia en él de infraestructuras y azarbes que actúan como barrera a la libre circulación de la escorrentía.

Otro factor a considerar en la exposición humana es el de la presencia de viviendas o edificaciones diseminadas en el medio rural, a causa de la transformación de usos del suelo de agrario a residencial que han sufrido muchas parcelas. Aspecto que se traduce en un incremento de la exposición por parte de la población y, por ende, mayor vulnerabilidad para la población. En efecto, en el mapa obtenido se refleja de manera esclarecedora la expansión del casco urbano ocupando zonas inundables, y la proliferación de viviendas aisladas, de fuerte componente turístico residencial, repartidas en toda la huerta de Daya Vieja.

Este factor es un elemento importante ya que los extranjeros desconocen las características climáticas y el comportamiento de los cauces del mediterráneo, por lo que son más vulnerables en caso de inundación (Fig. 3).

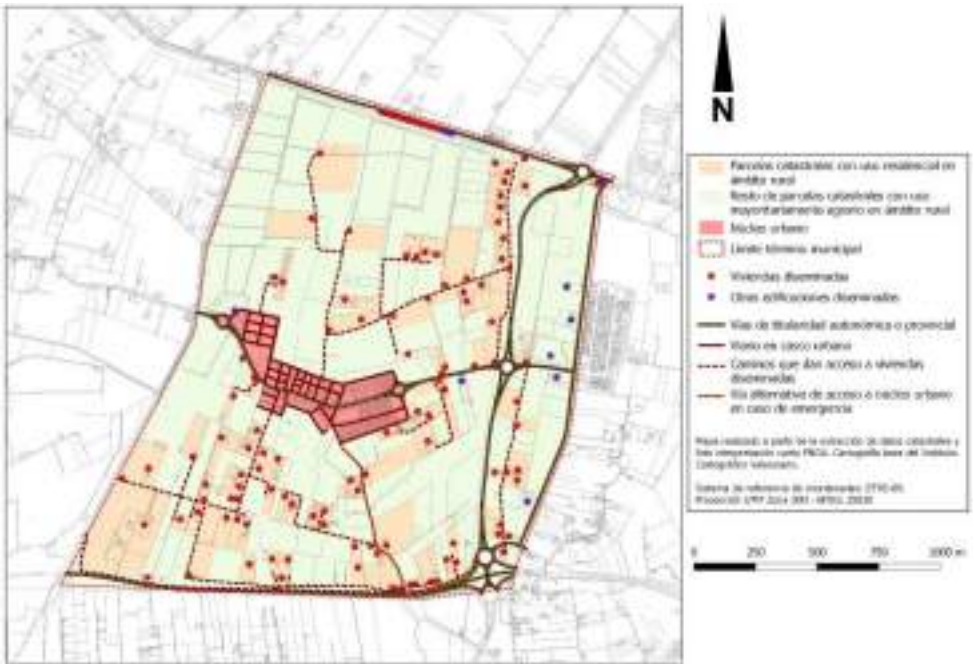


Figura 3. Casco urbano y poblamiento diseminado. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se ha realizado una modelización hidráulica del azarbe de la Reina, con la finalidad de replicar el espacio inundado en el episodio de septiembre de 2019. El mapa resultante muestra, de manera muy semejante a la realidad, las zonas que quedaron bajo las aguas, asociadas a un determinado calado, en todo el término municipal, de manera que se analiza la componente de peligrosidad a la que se expone la población (Fig. 4).

Los mayores calados se encuentran en las zonas más llanas del municipio, que se localizan en la parte nor-noreste y este del término municipal (0,60-2 m), que afectarían a las viviendas diseminadas, anteriormente señaladas (puntos rojos); a las que se añaden las del sector suroeste y sureste de la localidad afectadas por calados considerables (0,20-1,50 m). Además, buena parte del núcleo urbano de Daya Vieja se encontraría anegado con calados entre (0,10-0,60 m) a excepción del emplazamiento fundacional de la localidad que se ubica sobre un micro relieve, generado por el aporte de sedimentos de las avenidas de los barrancos y ramblas, y del río Segura.

Conviene destacar que queda un espacio sin anegar en el sur del núcleo que coincide con la Avenida Vicente Ferrer, siendo ésta la única vía de acceso alternativo al municipio en caso de inundación.

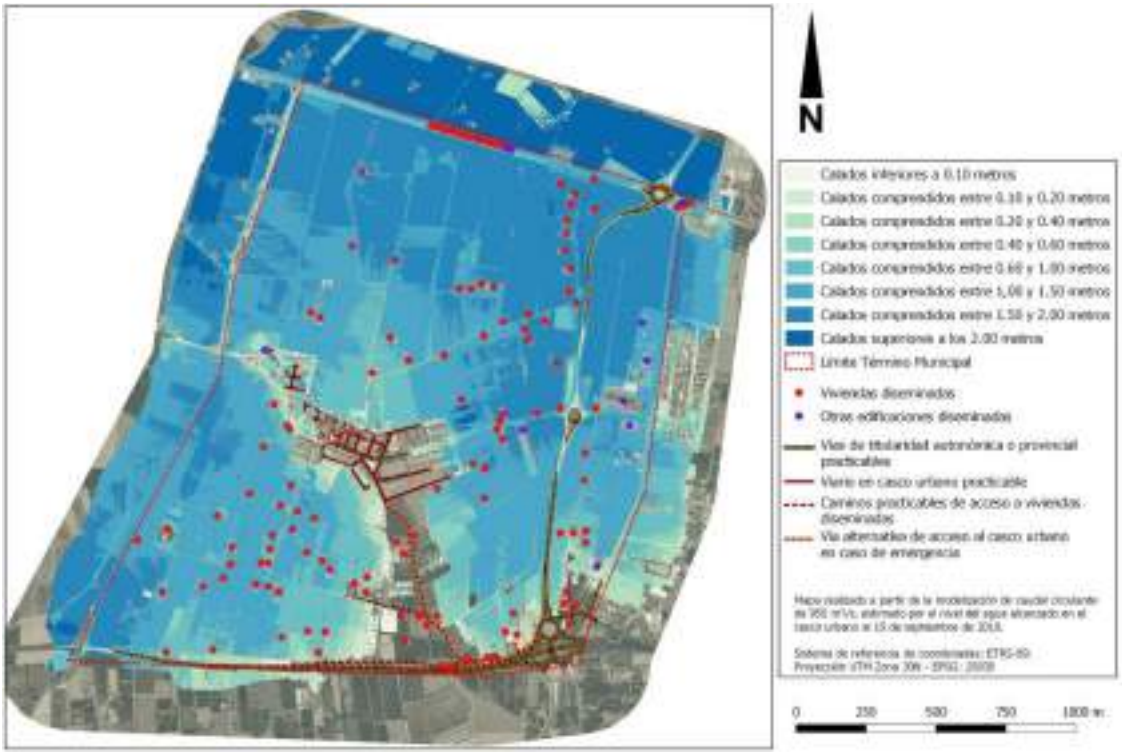


Figura 4. Resultado de la modelización del azarbe de la Reina en el municipio de Daya Vieja (Alicante). Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, y siguiendo la clasificación señalada en la Tabla 1, se concluye un mapa de vulnerabilidad clasificado en cuatro niveles (Fig. 5). Estos niveles representan la vulnerabilidad de cada una de las parcelas catastrales del municipio por cota altimétrica, calado y la presencia de viviendas o edificaciones aisladas.

Los niveles más altos de vulnerabilidad se corresponden con las zonas más deprimidas del municipio y, por tanto, las que registran mayores calados. Esta vulnerabilidad estaría incrementada por la presencia de viviendas diseminadas en estos ámbitos deprimidos, dando lugar al rango más alto de vulnerabilidad. Por contra, los niveles más bajos de vulnerabilidad se corresponden con las zonas más elevadas. No obstante, dada las condiciones físicas del entorno geográfico, existe la imposibilidad de asegurar que existan parcelas que, en un momento determinado, no queden afectadas en mayor o menor medida por una inundación; no se puede afirmar que existan parcelas con una vulnerabilidad baja, incluso en el casco urbano.

De esta manera, como se muestra en la Tabla 2, aproximadamente dos tercios de las parcelas catastrales del municipio presentan una vulnerabilidad alta y muy alta, que vienen a representar el 74% de la superficie total del término municipal; dato que viene a representar que, en el 74% de la superficie total del término municipal, se alcanzaron calados superiores a los sesenta centímetros en el episodio de inundación citado. Si, además, se le suma la superficie de viarios, caminos y red de acequias y azarbes, se estaría hablando de que más de tres cuartos de la superficie total del término municipal superaron ese valor de calado.

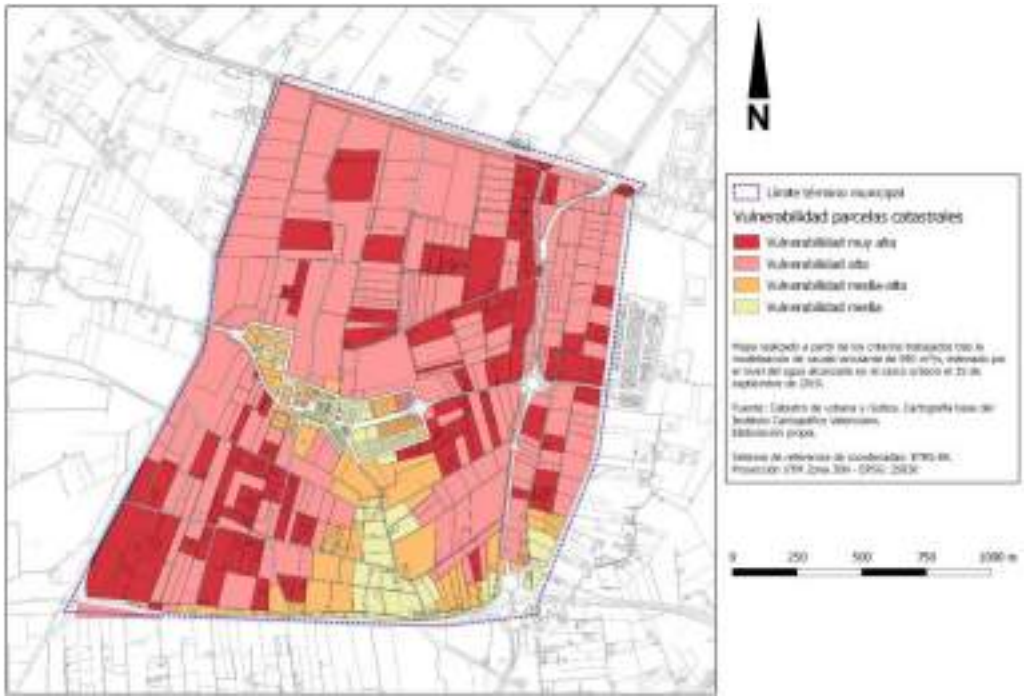


Figura 5. Vulnerabilidad del municipio de Daya Vieja ante el riesgo de inundación. Fuente: elaboración propia

Dentro de este ámbito, se han llegado a contabilizar 91 edificaciones diseminadas que dotan a sus respectivas parcelas una muy alta vulnerabilidad; más 33 edificaciones ubicadas al norte del término municipal, junto al azarbe de la Reina y la carretera CV-859. La amplia mayoría de estas 124 edificaciones son viviendas de las que resulta difícil discernir la proporción de viviendas secundarias o principales. Lo que cabe resaltar es que el conjunto de estas edificaciones quedó aislado en las inundaciones de septiembre de 2019, con la imposibilidad de acceder durante varios días.

NIVEL DE VULNERABILIDAD	Nº DE PARCELAS CATASTRALES	SUPERFICIE (km²)	% DEL TÉRMINO MUNICIPAL
Vulnerabilidad muy alta	91	0,69	22
Vulnerabilidad alta	229	1,64	52
Vulnerabilidad media-alta	76	0,27	9
Vulnerabilidad media	147	0,17	5

Tabla 2. Cuantificación de la vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

La definición del grado de vulnerabilidad de Daya Vieja deriva del análisis de varios factores previos. Por un lado, el cálculo altimétrico del área municipal y la identificación de las infraestructuras que funcionan como barreras ante el flujo de escorrentía. Con este análisis preliminar se puede conocer las zonas del municipio más expuestas ante la inundación, debido a su menor cota altimétrica. De otro lado, la modelización del azarbe de la Reina es otro factor que ha determinado la peligrosidad de inundación y puede reflejar con mayor o menor exactitud el episodio de fuerte precipitación analizado, pero sí que representa la realidad del momento percibido y vivido en dicho evento extraordinario. Con este resultado se pueden identificar las zonas del término municipal más expuesta ante el peligro, siendo estas la parte nor-noreste y este del municipio donde se representan los mayores calados por ser las zonas más deprimidas.

Tanto la metodología como los resultados obtenidos en esta investigación presentan una enorme posibilidad para resolver los problemas de vulnerabilidad frente a la inundación que presenta el área de estudio, y para la puesta en marcha de un Plan de Gestión de Emergencias Municipal en Daya Vieja. Este tipo de cartografía es vista por diversos autores como una herramienta dinámica para la gestión de la emergencia (Bodoque et al., 2016; Díez-Herrero et al., 2014; Díez Herrero & Pérez Guerrero, 2003; Olcina Cantos & Díez-Herrero, 2017), para el desarrollo de un Plan de Acción de Ámbito Local y la toma de decisiones por parte de los agentes implicados en las labores de socorro y asistencia (Sortino Barrionuevo & Perles Roselló, 2017). Los planes de protección civil o emergencias deberían considerarse como una medida preventiva de carácter no estructural muy necesaria, no sólo como herramienta para la gestión post-desastre (Díez Herrero, 2002; Díez Herrero et al., 2008).

La metodología propuesta, aunque resuelve el objetivo principal de este trabajo, determinando las zonas más vulnerables, puede presentar alguna carencia debido a la falta de información estadística a nivel municipal. Incluso los resultados de la propia modelización deben cuestionarse, ya que el dato de caudal introducido para la modelización es de 950 m^3/s, teniendo en cuenta que los azarbes poseen una capacidad cuyo valores reales oscilan entre los 10-15 m^3/s. Empero, esto no le resta valor a los resultados obtenidos, puesto que la modelización con dicho caudal ha permitido conocer, de manera semejante a la realidad, las zonas inundadas y los calados existentes que tuvieron lugar en el municipio en el episodio de inundación de septiembre de 2019. Asimismo, el planteamiento conceptual puede ser válido y novedoso, ya que presenta un análisis de la vulnerabilidad teniendo en cuenta que la finalidad de esta cartografía es la de elaborar un Plan de Gestión de Emergencias Municipal frente a inundaciones, cuya metodología es aplicable al resto de municipios de la comarca, y que, como se ha mencionado anteriormente, sienta las bases de un posible plan de emergencia a nivel regional.

Este análisis recobra mayor importancia ante el actual contexto de cambio climático, en el que el aumento del calentamiento global provocado por la acción humana prevé un aumento de los fenómenos atmosféricos extremos (AEMET, 2020).

Por estos motivos se ha elaborado una tabla con una serie de propuestas relacionadas con las medidas de reducción del efecto negativo de las inundaciones.

TEMÁTICA	PROPUESTAS
Inundaciones	-Recuperación de los aprovechamientos tradicionales del agua (aterrazamientos, sistema de boqueras, aljibes, azudes, etc.). -Aumento de la capacidad de los azarbes. -Mantenimiento y gestión de los azarbes (limpieza de cauces, dragado…).
Ordenación del Territorio	-Elaboración de cartografía de vulnerabilidad a escala municipal con los criterios anteriormente recogidos en la Tabla 1. -Elaboración de cartografía de riesgo de inundación a escala municipal -Revisión y elaboración del PGOU de Daya Vieja, vigente desde 2002, incluyendo las normativas aprobadas sobre inundaciones (Directiva 60/2007/CE, R.D. 9/2008 que modifica el RDPH, R.D. 903/2010, trasposición de la directiva; ETCV, PATRICOVA).
Planificación y Gestión de la Emergencia	-Elaboración de un Plan de Emergencias Municipal para Daya Vieja. -Elaboración de un Plan Actuación Municipal ante el riesgo de inundaciones en Daya Vieja. -Los residentes de las zonas diseminadas deberán evacuar hacia el aparcamiento del casco urbano, abandonando inmediatamente la huerta. -Protocolo de evacuación del municipio, para ello es necesario conocer el comportamiento del agua en este espacio, qué zonas se inundan o no. Establecer un punto de reunión para los vecinos de Daya Vieja. En este caso, el punto de reunión dentro del municipio debe ser el aparcamiento entre las Avenidas de las Cortes Valencianas y la CV-901. -La vía de acceso más practicable para acceder a Daya Vieja, en caso de inundación, es la Avenida Vicente Ferrer. -Balizamiento de los márgenes de caminos en zonas inundables mediante jalones.

Tabla 3. Propuestas para la mayor resiliencia del municipio de Daya Vieja. Fuente: elaboración propia.

La vigencia de un PGOU de casi veinte años, carente de estudios de inundabilidad, junto con la especulación y los procesos urbanísticos, explican el hecho de que, hoy en día, haya incrementado la exposición y, por ende, la vulnerabilidad por parte de la población.

En síntesis, la metodología y los resultados de esta investigación permiten sentar las bases para la elaboración de un Plan de Emergencias Municipal para Daya Vieja. Éste debe recoger una serie de medidas de adaptación a un evento de inundación, transmitiendo a la población qué debe hacer en cada momento. Si la inundación fuese importante, considerar la realización de una evacuación de los vecinos del municipio, de manera ordenada y coordinada. Es por ello que se plantean un punto de encuentro como zona “segura”, que se corresponde con el aparcamiento más grande del casco urbano; y la vía de acceso para los equipos de emergencia y evacuación de vecinos, que se procedería a realizar por la Avenida Vicente Ferrer. Esta vía fue el único punto de acceso al municipio de Daya Vieja ya que el resto del territorio era impracticable. De resultas, la aplicación de esta metodología puede hacer del municipio de estudio, un espacio más resiliente a las inundaciones, pudiendo ser utilizada en el resto de municipios que conforman la Vega Baja del Segura.

5. CONCLUSIONES

A modo de conclusión, se puede afirmar que el municipio de Daya Vieja presenta una vulnerabilidad muy elevada, prácticamente, en todo su término municipal. Sobre todo, aquellos espacios más deprimidos en el que se localizan las viviendas diseminadas y donde los calados que se acumulan son mayores. Como se ha hecho constar anteriormente, los procesos urbanísticos junto con un PGOU de Daya Vieja vigente hoy en día, desde el año 2002, han permitido la construcción de nuevos espacios de viviendas tanto en el casco urbano como viviendas diseminadas en la huerta *sensu stricto*, lo que explica el incremento de la exposición y de la vulnerabilidad por parte de la población.

La modelización realizada ha permitido conocer los espacios inundados en el episodio de septiembre de 2019, en el cual se han podido observar aquellas zonas que se vieron poco afectadas; unido a la cartografía de vulnerabilidad, permite localizar aquellos espacios "seguros" y aquellos a los que mayor atención se le debería prestar en caso de emergencia (viviendas diseminadas y núcleo urbano). Es por ello que una de las propuestas señala como punto de evacuación el aparcamiento de Daya Vieja, que conecta con la Avenida Vicente Ferrer, para los puntos de acceso y salida más "seguros" para los cuerpos de emergencia y los vecinos, respectivamente.

La suma de los resultados cartográficos obtenidos presenta una enorme aplicabilidad asentando las bases de un Plan de Emergencias para las Inundaciones en el municipio de Daya Vieja.

REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología. (2020). *Proyecciones climáticas para el siglo XXI* [en línea]. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat
- Biener Camacho, S. & Prieto Cerdán, A. (2019). Inundaciones de septiembre de 2019 en la Vega Baja del Segura: causas y consecuencias. *Canelobre. El Agua En La Provincia de Alicante. Territorio, Patrimonio e Innovación*, 70, 31–45.
- Bodoque, J. M., Amérigo, M., Díez-Herrero, A., García, J. A., Cortés, B., Ballesteros-Cánovas, J. A. & Olcina, J. (2016). Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, 541, 665–676. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.005
- Box Amorós, M. (1985). *Las zonas húmedas de la provincia de Alicante y los procesos de intervención antrópica*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, Alicante. http://hdl.handle.net/10045/3323
- Camarasa-Belmonte, A. & Caballero López, M. (2018). Lluvias in situ en la Comunidad Valenciana. Relación entre indicadores pluviométricos, llamadas al centro de coordinación de emergencias (112) y relación de daños, durante el episodio de 26-30 de noviembre de 2016. En: J. P. Montávez, J. J. Gómez Navarro, J. M. López Romero, L. Palacios Peña, M. Turco, S. Jerez, … O. Meseguer Ruiz (Eds.), *El clima: aire, agua, tierra y fuego*, 233–244. http://hdl.handle.net/20.500.11765/9904
- Camarasa-Belmonte, A. M. & Soriano-García, J. (2012). Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). *Landscape and Urban Planning*, *104*(2), 189–200. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.009
- Díez-Herrero, A., Fernández, L., Bodoque, J. M., Ballesteros, J. A., Ruiz-Villanueva, V., Sánchez-Silva, M. & García, F. (2014). El análisis de riesgo de inundaciones en el Plan de Actuación Local de Protección Civil de Navaluenga (Ávila). En: S. Schnabel & Á. Gómez Gutiérrez (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, 48–51. Cáceres.

- Díez Herrero, A. (2002). Análisis del riesgo de inundación y protección civil. In F. J. Ayala-Carcedo & J. Olcina Cantos (Eds.), *Riesgos Naturales* (1ª ed, p. 1512). Ariel Ciencia, Barcelona.
- Díez Herrero, A., Garrote Revilla, R., Baíllo Calvo, R., Laín huerta, L., Macebo Mancebo, M. J. & Pérez Cerdán, F. (2008). Análisis del riesgo de inundación para planes autonómicos de protección civil: RICAM. En: I. Galindo Jiménez, L. Laín Huerta & M. Llorente Isidro (Eds.), *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*, 53–70. Instituto Geológico y Minero de España y Consorcio de Compensación de Seguros (MEH), Madrid.
- Díez Herrero, A. & Pérez Guerrero, J. A. (2003). Los SIGs en el Plan de protección civil de ámbito local ante el riesgo de inundaciones de Navaluenga (Ávila, España). *Seminario Euromediterráneo Sobre Nuevas Tecnologías Aplicadas a La Gestión de Desastres. Foro Euromediterráneo Sobre Prevención de Catástrofes*, 11. http://www.andresdiezherrero.es/publicaciones/capitulos_de_libros/diez_y_perez_2003.pdf
- Gil Olcina, A. & Canales Martínez, G. (1989). Creación, disolución y parcelación del señorío alfonsino de Daya Vieja. *Investigaciones Geográficas*, 7, 31–50. https://doi.org/10.14198/INGEO1989.07.04
- Gil Olcina, A. & Canales Martínez, G. (2007). *Residuos de propiedad señorial en España. Perduración y ocaso en el Bajo Segura*. Cátedra Arzobispo Loazes y Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante.
- Giménez-Font, P. (2008). *Las transformaciones del paisaje valenciano en el siglo XVIII. Una perspectiva geográfica*. Institució Alfons el Magnànim, Diputació de València, Valencia.
- Míguez, R. (2019, 15 de septiembre). El corazón de la Vega Baja, anegado por su río Segura. *Diario Información*, 4-5.
- Olcina Cantos, J. (2006). *¿Riesgos Naturales? I. Sequías e inundaciones* (1ª ed.). DaVinci Cantinental. Colección Geoambiente XXI, Barcelona.
- Olcina Cantos, J. & Díez-Herrero, A. (2017). Cartografía de inundaciones en España. *Estudios Geograficos*, *78*(282), 283–315. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201710
- Olcina Cantos, J. & Oliva Cañizares, A. (2020). Medidas estructurales versus cartografía de inundación en la valoración del riesgo en áreas urbanas: El caso del barranco de las Ovejas (Alicante, España). *Cuadernos Geográficos*, *59*(2), 199–220. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.10278
- Pérez Morales, A., Navarro Hervás, F. & Álvarez Rogel, Y. (2016). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad social en poblaciones afectadas por el peligro de inundación: el caso de Águilas (Murcia, sureste ibérico). *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, *62*(1), 133. https://doi.org/10.5565/rev/dag.242
- Sortino Barrionuevo, J. F., & Perles Roselló, M. J. (2017). Metodología para una cartografía de vulnerabilidad del territorio frente al riesgo de inundación relacionado con los sistemas de socorro y asistencia. Aplicación al área inundable del bajo Guadalhorce (2016). *Papeles de Geografía*, (Número monográfico del XV Coloquio Ibérico de Geografía), 157–178. https://doi.org/https://doi.org/10.6018/geografia/2017/307051

VULNERABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO TERRITORIAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA, PROVINCIA DEL AZUAY (ECUADOR)

Johnny Mena Iza
jrmena@uce.edu.ec

Yessenia Alquinga Herrera
ypalquinga@uce.edu.ec

Teresa Palacios Cabrera
tapc1@ua.es

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

RESUMEN

Diversos estudios de cambio climático realizados en Ecuador han demostrado que en los últimos años ha existido retroceso en los glaciares producto del aumento de la temperatura, se ha evidenciado la degradación y desertificación de páramos, y el incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos. En distintos lugares del país, se han desarrollado varias iniciativas dirigidas a la adaptación y mitigación al cambio climático. Este artículo, tiene como objetivo analizar el riesgo climático de lluvias intensas en la subcuenca del río Machángara en Azuay provincia de Ecuador, para lo cual se utilizó dos escenarios: (1985–2015) y la Trayectoria de Concentración Representativa escenario 4.5 (RCP 4.5, en adelante) desde 2016-2040. Se consideró indicadores para estimar el riesgo climático, en función de la amenaza, exposición y vulnerabilidad, clasificándolos a cada uno de ellos en cinco categorías: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja. Evidenciando que la parroquia (unidad más pequeña de la división territorial de la República del Ecuador) de Gualleturo mantiene el nivel muy alto de riesgo climático (nivel 5), la parroquia de Ricaurte y Cuenca están en el nivel bajo de riesgo climático (nivel 2), mientras que las parroquias de Chiquintad y Sayausí se mantiene en el nivel moderado (nivel 3) para los dos escenarios.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es el aumento progresivo y gradual de la temperatura media de la superficie terrestre, está relacionado con el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, siendo responsable de los cambios en los patrones climáticos mundiales (González et al., 2003). El cambio climático es definido por la Convención Marco sobre el Cambio Climático (1992), como el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables. Según El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), en las últimas tres décadas han sido las más cálidas en la superficie de la Tierra, comparadas con cualquier década anterior desde 1850. Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente muestran un calentamiento de 0,85 [0,65 a 1,06] °C, durante el período 1880-2012 (IPCC, 2014). La tendencia en el incremento de la temperatura global promedio, supera el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo

de los 2°C para el final de siglo según lo acordado en el Acuerdo de París (FAO- GCI, 2017).

En el Quinto Reporte (AR5) del Grupo de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2014), señala que las tendencias observadas de la temperatura en la región Latinoamericana han aumentado de 0,7°C a 1°C desde la década de 1970. Frente a esta realidad, los países deben hacer uso de escenarios de cambio climático para su planificación a mediano y largo plazo (PACC, 2009).

Se puede citar algunas evidencias del efecto del cambio climático en el sistema hídrico, como: modificaciones del caudal (PACC, 2009), proliferación de vectores (MAE, 2017), retroceso de glaciares andinos (Alianza Clima y Desarrollo, 2014).

En el Ecuador las emisiones totales de gases de efecto invernadero ascienden a 80627,16 Gg de CO2-eq, producidos de la siguiente manera: sector Energía (46,63%), USCUSS (25,35%), sector Agricultura (18,17%), sectores de Procesos industriales y Residuos (10%) (MAE, 2017). A pesar de que Ecuador es marginal en generar emisiones de gases de efecto invernadero, ha demostrado un verdadero compromiso ante la comunidad internacional para afrontar el cambio climático, participando de forma activa en procesos de negociación internacional, y apoyando al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, s.f; Quishpe, 2017). Los impactos del cambio climático en el Ecuador, se han identificado a partir de observaciones hidrometeorológicas en las que se aprecian importantes cambios en la precipitación y aumentos en la temperatura, lo cual se ha visto reflejado en la intensificación de fenómenos de variabilidad natural, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), lo que incide de forma adversa en el desarrollo del país (MAE, 2017), como ejemplo se puede mencionar el fenómeno El Niño 1982-1983 provocó una caída del 2.8% en el PIB; en El Niño 1997-1998 las perdidas representaron un 15% del PIB; en el 2008 durante la fuerte temporada invernal, 13 de 24 provincias sufrieron impactos, obligando a 1422 personas a abandonar sus viviendas, la instalación de 331 albergues, además 37 personas murieron y 137000 hectáreas de cultivos fueron afectadas (UNDP , 2007).

Con estos antecedentes, el presente estudio tiene como objeto evaluar la vulnerabilidad y riesgo climático que afectan a las poblaciones ubicadas en la subcuenca del río Machángara en la provincia del Azuay. Partiendo de la recolección de información secundaria cualitativa y cuantitativa de fuentes oficiales como el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Sistema Nacional de Información (SIN), los catálogos de metadatos del país, entre otros. A partir de esta información se identificaron indicadores cualitativos y cuantitativos que permiten evaluar la vulnerabilidad y riesgo ante efectos del cambio climático en la zona de estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1. Determinación de la zona de estudio

Se realizó un análisis y evaluación de características de la población y su entorno permitiendo describir el comportamiento numérico de las variables (Alquinga y Mena, 2019). Se empleó indicadores cualitativos y cuantitativos de fuentes oficiales de información nacional e internacional como el INEC, INAMHI, SIN, catálogo de metadatos, entre otros. Para el manejo y procesamiento de esta información se realizó un tratamiento estadístico mediante el uso del software libre Rstudio y el software ArcGIS versión 10.3 del Laboratorio de Cómputo de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental.

En la Figura 1 se presenta el área de estudio de la subcuenca del río Machángara ubicada en la provincia del Azuay, la cual forma parte de la cuenca del río Paute de la vertiente del Amazonas, tiene un área aproximada de 325 km^2 dividida en tres microcuencas: alta y baja del Machángara,

media del río Chulco, además, se encuentra ubicada dentro de tres regiones bioclimáticas (páramo muy lluvioso, lluvioso subtemperado y muy húmedo temperado), y su temperatura promedio oscila de 7°C en las zonas altas y de 13°C en zonas bajas. Esta subcuenca es utilizada para proveer de agua para consumo humano, riego, usos industriales como es la generación de energía del complejo hidroeléctrico Machángara (centrales "Saucay" y "Saymirín") con las presas de almacenamiento "El Labrado" y "Chanlud", las cuales tienen una capacidad de instalación aproximada de 38 MW turbinando caudales promedios de 5220 m^3/s (MAE- AICCA, 2018).

La investigación tomó como unidad de análisis territorial las 13 parroquias que conforman la subcuenca del río Machángara (Figura 1).

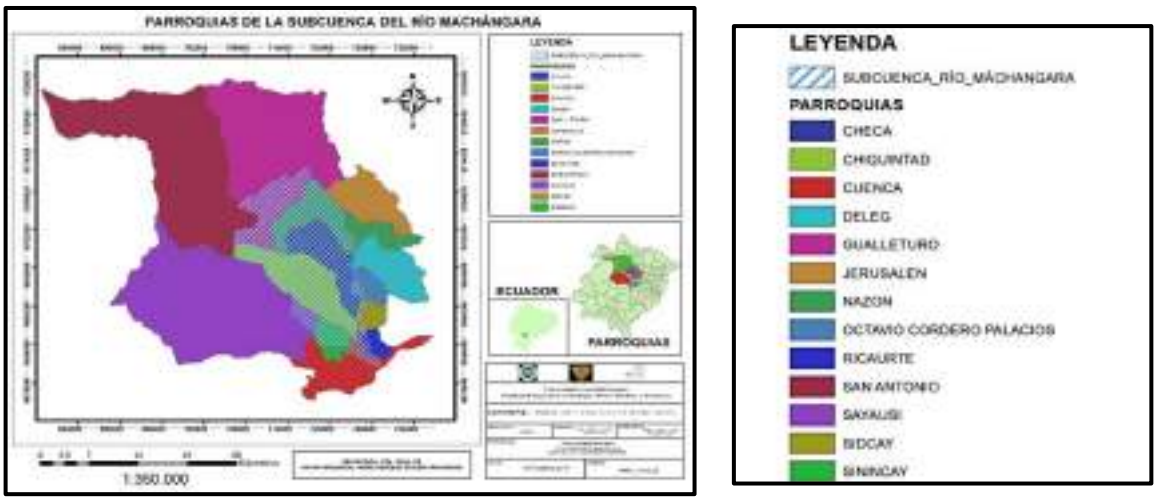


Figura 1. Parroquias de la subcuenca del río Machángara. Fuente: elaboración propia.

2.2. Delimitación de la Cuenca

La subcuenca del río Machángara y red de drenaje se calculó en base al modelo digital del terreno, utilizando como referencia los niveles del sistema Pfafstetter (SENAGUA, 2009). Por lo tanto, comparando la zona de estudio con el nivel 5 Pfafstetter, se puede decir que la delimitación de la subcuenca es confiable debido que se encuentra de acuerdo con el margen de las unidades hidrológicas oficiales.

2.3. Ecuación de Riesgo climático

Para la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo climático territorial, se utilizó la ecuación (1) de la metodología presentada en la Tercera Comunicación Nacional del Ecuador (TCN) y el quinto reporte de la IPCC del año 2014 (AR5), que abordan a las dimensiones territoriales como factores fundamentales para evaluar los efectos del cambio climático (MAE, 2017).

$$Riesgo\ climático = f(Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad)$$

$$Vulnerabilidad = f\left(\frac{sensibilidad}{capacidad\ adaptativa}\right)$$

$$Riesgo\ climático = A \times E \times \frac{S}{Ca} \quad (1)$$

2.4. Identificación de la Amenaza climática actual y futura

La amenaza climática que se utilizó para el análisis del riesgo climático actual y futuro (RCP 4.5) son las lluvias intensas, debido que el área de estudio ha presentado en los últimos años temporadas

anormales con exceso y déficit de precipitación en periodos extendidos, que provocan la aparición de impactos como inundaciones, deslizamientos, tempestades, entre otras (Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2014).

2.5. Amenaza climática actual

La incidencia actual de las lluvias intensas en el área de estudio, se la estimó con los registros hidrometeorológicos de 14 estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) que disponía de una serie de datos de 30 años desde 1985-2015, a estos datos se le dio un tratamiento estadístico a través del Rclimatol que contiene funciones para la homogenización, control de calidad y llenado de datos ausentes de las series climatológicas (Guijarro, 2018).

Los resultados obtenidos del RClimatol fueron comprobados a través de métodos estadísticos como coeficiente de correlación, las pruebas de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT), el coeficiente de variación, curva doble masa, entre otras; con la finalidad de verificar la fiabilidad de la homogenización y llenado de datos. (Guajardo et al., 2014).

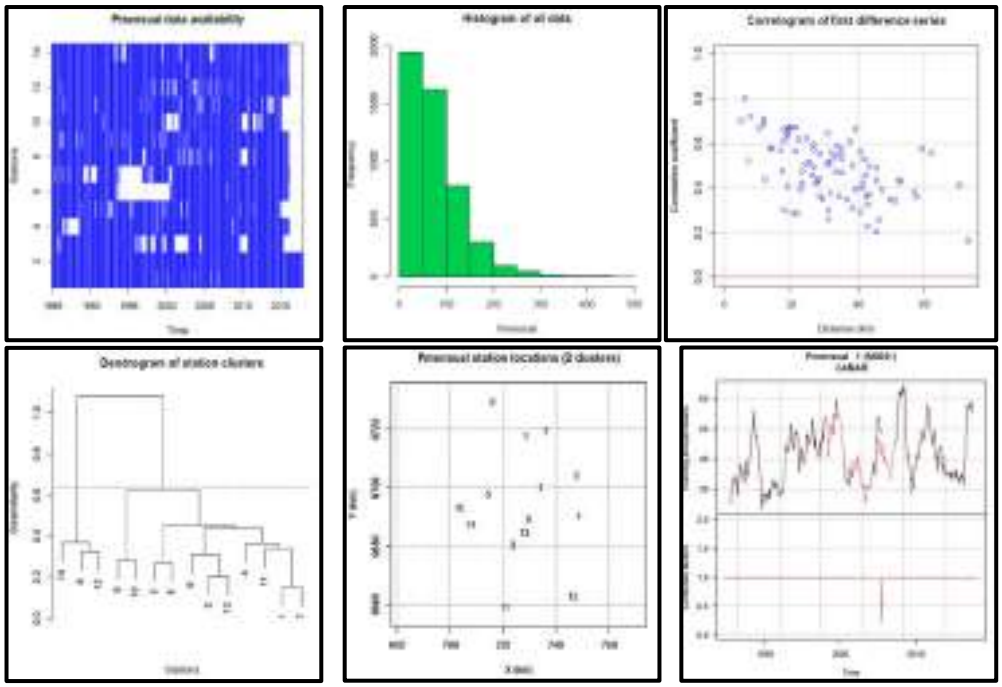


Figura 2. Correlación de la serie de datos históricos. Fuente: elaboración propia, output- RClimatol.

2.6. Amenaza climática futura

De acuerdo con el Quinto informe del IPCC (AR5) a finales del siglo XXI la temperatura global superficial superará el 1,5 °C con respecto al período de 1850 y 1900 para todas los RCPs (RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) excepto el RCP 2.6 (IPCC, 2014). Con lo expuesto anteriormente, se analizó la incidencia futura (2011–2040) de las lluvias intensas bajo el escenario RCP 4.5 que es una trayectoria de concentración intermedia de 650 ppm de CO^2 en la cual el forzamiento radiactivo se estabiliza en 4,5 W/m; en el mismo contexto se utilizó las proyecciones climáticas generadas como insumo de la Tercera Comunicación Nacional del Ecuador donde se logra la reducción de escala de los modelos climáticos globales a un tamaño de celda (10 km X 10 km) para los cuatro escenarios de cambio climático en los periodos de 2011 – 2040; 2041- 2070; y 2071 – 2100 (MAE, 2017).

2.7. Indicador de lluvias intensas

Para el análisis de la amenaza se utilizó el Índice simple de intensidad diaria (SDII) que se compone

por la precipitación total anual y el número de días con precipitación, como se muestra en la siguiente ecuación (2) (Hammill, 2018).

$$SDII_j = \frac{\sum_{Af}^{Ai} Precipitación\ total\ anual}{\sum_{Af}^{Ai} días\ con\ precipitacion\ al\ año > 1\ mm} \quad (2)$$

Debido a que la investigación tiene un enfoque multianual la ecuación fue adaptada al período de los datos meteorológicos; para el escenario actual los resultados obtenidos fueron comparados con el sistema de inventario de efectos de desastres conseguidos de fuentes globales como DesInventar que recopila la información sistemática sobre la ocurrencia de desastres ocurridos en América Latina desde la década de los 90 (DESINVENTAR, 2019), adicional a este indicador se consideró la pendiente promedio del área de estudio con el fin de identificar las áreas con pendientes superiores a 45° y que son propensas a deslizamientos.

2.8. Factor de Exposición

La selección del elemento expuesto se realizó considerando que este no sea modificable en el tiempo y con alto grado de influencia tanto en el sistema humano como natural, por lo cual se realizó el análisis morfométrico del mismo, determinando el área, longitud total de los cauces, número de orden, densidad de drenaje y relación de bifurcación como se muestra en la Figura 3. En base al estudio desarrollado por (CIIFEN, 2018) en el Chinchiná-Colombia, se consideró utilizar la densidad de drenaje adaptado a la unidad de análisis (parroquial) como se muestra en la ecuación (3) de la Figura 3 de la subcuenca del rio Machángara; es así que se calculó la red hidrológica de orden de la portante a partir del cálculo del número de Strahler (Doffo & Bonorino, 2005).

$$\sum \frac{Nu \times \sum L_{Nu}}{A} \quad (3)$$

Donde: Nu: Orden del aportante; L_{nu}: Longitud de la aportante (Km); A: Área Parroquial (km^2).

Orden (U)	Número de orden (Nu)	Relación de Bifurcación (Rb)	Longitud total (km) de los cauces de orden U
1	965		377,333567
		5,16042781	
2	187		163,766991
		4,56097561	
3	41		85,8683841
		4,1	
4	10		54,5220075
		10	
5	1		37,5568996
	ΣRb	23,8214034	ΣL 719,047
	Rb	5,95535085	Dd 2,21

Figura 3. Ecuación de la densidad de drenaje adaptada para la unidad parroquial y análisis morfométrico de la subcuenca. Fuente: elaboración propia.

2.9. Factor de Vulnerabilidad

Se calculó en función de la sensibilidad y la capacidad adaptativa territorial considerada en la ecuación (1), tomando como base indicadores socioeconómicos y ambientales del registro de datos de instituciones nacionales como el INEC, SNI, y los catálogos de metadatos de las instituciones públicas, con el propósito de obtener datos estadísticos confiables a nivel parroquial. (CIIFEN, 2018).

2.10. Indicador de Sensibilidad

En la selección de los indicadores se consideró características económicas, ambientales y sociales de las poblaciones sensibles a los eventos extremos del cambio climático seleccionando: 1) Porcentaje de población con necesidades básicas insatisfechas; 2) Tasa de analfabetismo; 3) Densidad poblacional; 4) Porcentaje de población ocupada en actividades dependientes del clima (agricultura,

ganadería, caza y silvicultura); 5) Porcentaje de hogares que habitan en viviendas con características físicas inadecuadas; 6) Porcentaje de hectáreas con conflicto de uso de suelo; 7) Porcentaje de deforestación (INEC, 2010; MAE, 2017; Monterroso, 2012).

2.11. Indicador de Capacidad adaptativa

Estos indicadores se centraron en parámetros sociales y ambientales de protección, sin considerar parámetros políticos administrativos, debido que los planes de desarrollo y ordenamiento territorial del año 2018 a nivel parroquial no contaban con información de referencia sobre medidas y acciones de adaptación y mitigación ante los efectos del cambio climático, se seleccionaron los siguientes: 1) Porcentaje de población de 12 años o más por aportación o afiliación al seguro social, 2) Tasa alfabetismo, 3) Porcentaje de viviendas con eliminación de aguas servidas por la red pública de alcantarillado, 4) porcentaje de viviendas con servicio eléctrico de empresa pública, 5) Porcentaje de cobertura de bosque y vegetación protectora (MAE, 2017; INEC, 2010).

3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Operación de normalización métrica

Dado que los indicadores e índices pueden ser medidos a diferentes escalas y unidades, no es posible realizar operaciones matemáticas para calcular un valor, por lo cual se procedió a normalizar todos los datos obtenidos mediante la siguiente ecuación (4).

$$X_{i,0\ a\ 1} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

Donde: Xi, o a 1: Punto de datos normalizado. Adimensional, valor entre 0 y 1;
Xi: Punto de datos individuales a ser transformado; Xmin: Valor más bajo para el indicador.; Xmax: Valor más alto para el indicador

3.2. Operación de normalización categórica

Para estandarizar los resultados obtenidos de la normalización métrica, se aplicó en primera instancia una distribución continúa para describir la probabilidad de los valores de las variables aleatorias en un conjunto de valores conocidos, a este resultado se aplicó una normalización categórica (distribución discreta), cuyo resultado son números enteros sucesivos en el rango de 1 a 5 normalizado es decir que los valores obtenidos en los factores adoptarán valores categóricos distribuidos en cinco clases de evaluación como se muestra en la Tabla 2.

Niveles de clases	Descripción
5	Critica o muy alta (sistema ya no funciona)
4	Bastante negativa o alta
3	Neutral o moderada
2	Bastante positiva o baja
1	Óptima o muy baja (sin mejora necesaria o posible)

Tabla 2. Valores métricos del indicador- categórico. Fuente: adaptada de GIZ (2017).

En el cálculo de probabilidad de variables continuas existen diversos métodos de distribución. Para la investigación se consideró la distribución beta ya que es adecuada para variables aleatorias en intervalos de 0 a 1, lo que la hace apropiada para modelar proporciones. Además, el principal recurso de esta distribución es el ajuste a diferentes distribuciones empíricas, debido que adopta formas diversas dependiendo de los valores de los parámetros (FAO-GCI, 2017).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez validada la información de los resultados obtenidos por el Rclimatol, se procedió al calculó de las isoyetas e isotermas para el período 1985–2015; el mapa de isoyetas se lo obtuvo mediante la técnica de interpolación geoestadística kriging presentando valores de precipitación acumulada promedio multianual de 877 mm al 1215 mm, y el mapa de las isotermas se calculó mediante la técnica de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) obteniendo temperaturas medias de 8,8°C y 16,3°C. Estos valores resultantes del área de estudio son similares al estudio realizado por (Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2014) en su Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial, además mencionan que en el área existe la presencia de dos ciclos lluviosos, el primero de ellos en el mes de abril y el segundo en el mes de octubre, y temperaturas anuales entre 8°C en el páramo andino y 15°C en la zona media y baja de la subcuenca del río Machángara.

En cuanto a los deltas de variación promedio de precipitación y temperatura entre el escenario actual y futuro (RCP 4.5), se obtuvo que para la precipitación anual exista un incremento promedio de 3,43% y una temperatura media entre 0,5°C a 1°C en el escenario RCP 4.5 en el período de 2016-2040, según (Armenta et al., 2014) en su estudio, los incrementos de temperatura media para el período del 2011 al 2040 sería como límite máximo 1°C para los cuatro escenarios. Para las variables antes mencionadas, según (MAE, 2017) en el Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, los deltas de variación promedio para el escenario RCP 4.5 oscilan alrededor 4,05% (precipitación) y 0,65 °C (temperatura) para la región de la sierra.

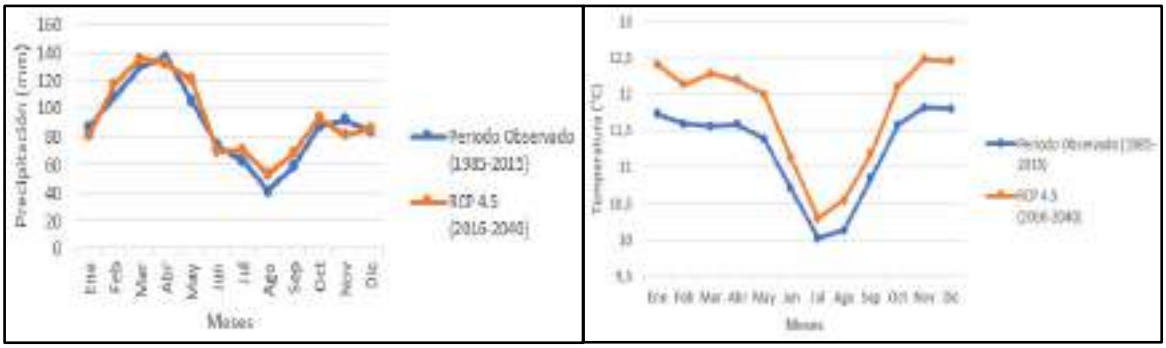


Figura 4. Variaciones de los valores de temperatura media y precipitación en los escenarios actual (1985- 2015) y futuro RCP 4.5 (2016 – 2040).

4.1. Factor de Amenaza Climática (Lluvias intensas)

En la Tabla 3 se muestra la normalización categoría obtenida del índice simple de intensidad diaria (SDII) como indicador de la amenaza de lluvias intensas, los valores promedios resultantes para el escenario observado (1985–2015) es de 4,89 mm/día y 4,15 mm/día en el escenario RCP 4.5 (2016–2040). Utilizando como referencia la base de datos de (DESINVENTAR, 2019), se obtuvo que las parroquias con mayor número de eventos extremos causadas por las lluvias intensas en el período 1985-2015 son Sayausí, Sinincay, Gualleturo y Chiquintad. Además, se debe acotar que el área presenta pendientes superiores a 45° siendo propensas a sufrir impactos del cambio climático.

4.2. Factor de Exposición

La densidad de drenaje adaptada a la unidad de análisis (parroquial) de la subcuenca del Río Machángara, dio como resultado que la parroquia Ricaurte tiene una exposición muy baja (nivel 1), la parroquia Sayausí una exposición baja (nivel 2), la parroquia de Cuenca una exposición muy alta (nivel 5). La relación de bifurcación de 5.96 según (Docampo et al., s.f.) indica que tiene una torrencialidad moderadamente alta, lo que provocaría un aumento sustancial del caudal de la subcuenca, como se evidencia en la Tabla 3 y Figura 4.

4.3. Factor de Vulnerabilidad

Con la relación existente entre el componente de sensibilidad y capacidad adaptativa según la ecuación (1), se determinó que los indicadores con mayor ponderación para el índice de sensibilidad son la deforestación y actividades económicas dependientes del clima (agricultura, ganadería, silvicultura y pesca) con 0,16; y la tasa de analfabetismo tienen un peso de 0,15. Para el índice de capacidad adaptativa los indicadores con mayor peso son cobertura de bosque y vegetación protectora con 0,24; y el porcentaje de personas que saben leer y escribir con 0,21 (Alquinga & Mena, 2019). Con los resultados obtenidos de sensibilidad y capacidad adaptativa, se calculó el factor de vulnerabilidad territorial dando como resultados que la parroquia de Gualleturo tiene una vulnerabilidad muy alta (nivel 5), las parroquias de Nazón y Octavio Cordero Palacios presentan una susceptibilidad moderada (nivel 3) y el resto de las parroquias se encuentran categorizadas en niveles bajos y muy bajos (nivel 1 y 2). En concordancia con la investigación de (Jiménez, 2018) en su estudio, la zona alta de subcuenca presenta una alta vulnerabilidad (nivel 4 a 5), mientras que las zonas bajas de la subcuenca se encuentran con niveles bajos de vulnerabilidad (nivel 1 a 2), como se muestra en la Tabla 3.

4.4. Riesgo climático territorial

Considerando los resultados calculados del factor de amenaza, exposición y vulnerabilidad se estimó el riesgo climático para lluvias intensas del área de estudio, obteniendo que el riesgo en el escenario actual y futuro RCP 4.5 la parroquia de Gualleturo mantiene el nivel alto de riesgo (nivel 5), la parroquia de Ricaurte y Cuenca están en el nivel bajo de riesgo (nivel 2) esto se debe a la capacidad adaptativa que tienen, mientras que las parroquias de Chiquintad y Sayausí se mantiene en el nivel moderado (nivel 3) en los dos escenarios, como se muestra en la Figura 5.

PARROQUIAS	AMENAZA CLIMÁTICA		FACTOR DE EXPOSICIÓN	INDICE DE VULNERABILIDAD (Sensibilidad/capacidad adaptativa)
	HISTORICO	RCP 4.5		
	SDII (1998-2018)	SDII (2019-2041)		
Checa	1	1	3	2
Chiquintad	4	1	3	2
Octavio Cordero Palacios	1	1	3	3
Ricaurte	3	1	1	1
Sayausí	5	1	2	2
Sidcay	2	4	3	2
Sinincay	4	1	3	2
Cuenca	3	1	2	1
Nazón	2	1	3	3
Gualleturo	5	1	3	5

Tabla 3. Normalización categórica del factor de Amenaza a lluvias intensas, exposición y vulnerabilidad.

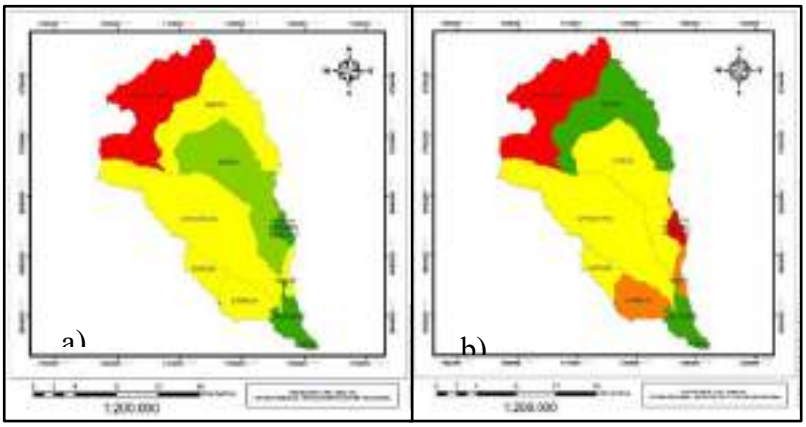


Figura 5. Riesgo climático - Lluvias intensas: a) Escenario actual; b) Escenario RCP. 4.5.

5. CONCLUSIONES

El estudio realizado en la subcuenca del rio Machángara ubicada en la provincia del Azuay de Ecuador, para la estimación del riesgo climático territorial para el escenario observado o actual (1985-2015) y el escenario futuro RCP 4.5 (2016-2040), utilizó en total 16 indicadores, de los cuales 1 compone el factor de amenazas (Índice simple de intensidad diaria–SDII), 1 el factor de exposición (densidad de drenaje a nivel parroquial) y 12 forman parte del factor de vulnerabilidad (7 de sensibilidad y 5 de capacidad adaptativa), además 2 indicadores de apoyo (porcentaje de pendientes y el número de eventos extremos).

El Índice simple de intensidad diaria (SDII, por sus siglas en inglés) con apoyo de la herramienta DESINVENTAR obtuvo que las parroquias ubicadas en la parte alta de la subcuenca del río Machángara son propensas a presentar impactos negativos ante las lluvias intensas en el escenario actual y futuro. Por otra parte, con los resultados obtenidos del análisis morfométrico de la subcuenca del Río Machángara, se obtuvo una relación de bifurcación 5,9 indicando que esta tiene una torrencialidad moderadamente alta, lo que podría ocasionar un incremento sustancial en el caudal de los ríos producto de las precipitaciones.

La estimación del riesgo climático en el estudio permitió conocer el nivel de riesgo territorial de cada parroquia, ante la amenaza lluvias intensas actuales y futuras, obteniendo que la parroquia de Gualleturo tiene un nivel 5 de riesgo con muy alta, la parroquia de Ricaurte y Cuenca están en el nivel bajo de riesgo (nivel 2), debido a la alta capacidad adaptativa que tienen, mientras que las parroquias de Chiquintad y Sayausí se mantiene en el nivel moderado de riesgo (nivel 3) en los dos escenarios.

Cabe mencionar que estos resultados dependen del grado de sensibilidad y capacidad adaptativa de cada parroquia. Permitiendo a los Gobiernos Autónomos Descentralizados locales conocer los factores que influyen negativamente en su jurisdicción y de esa manera tomar medidas y acciones de mitigación y adaptación para afrontar el cambio climático.

REFERENCIAS

- Alquinga, Y. & Mena, J. (2019). *Vulnerabilidad y riesgo climático territorial en el área de la subcuenca del Río Machángara de la provincia del Azuay*. Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Ambiental. Carrera de Ingeniería Ambiental. Quito: Universidad Central del Ecuador. http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/18166/1/T-UCE-0012-FIG-092.pdf
- Alianza Clima y Desarrollo (2014). *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implica para América Latina?*. https://cdkn.org/wp-content/uploads/2014/12/INFORME-del-IPCC-Que-implica-para-Latinoamerica-CDKN.pdf
- Armenta, G., Delgado, J., Rodríguez, A. & Ruiz, J. (2014). *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia*. http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-rcp-2014.pdf
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño - CIIFEN (2018). *Guía metodológica para análisis de vulnerabilidad ante eventos climáticos de la cuenca del río Chinchiná*, Colombia. Guayaquil: Publiasesores Cia. Ltda. http://cuencasresilientes-ciifen.org/es/images/pdf/Guia-Metodologica-para-el-analisis-de-vulnerabilidad-Chinchina.pdf
- DESINVENTAR.org (2019). *Sistema de Inventario de efectos de desastres*. https://www.desinventar.org/es/software
- Doffo, N. & Bonorino, G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(1), 16-

22.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, GIZ (2017). *El libro de la Vulnerabilidad: Conceptos y lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad.* hFAOttps://www.adaptationcommunity.net/?wpfb_dl=269
- Guajardo, P., Granados, R., Sánchez, C. & Díaz, P. (2014). *Homogeneidad de varianza a series de precipitación y temperatura e estaciones del estado de Veracruz y áreas aledañas*. http://www.ommac.org/memoria2014/extensos/E2014092606.pdf
- Guijarro, J. (2018). Rclimatol: *Climate Tools (Homogenization of climatic series with Climatol)*. http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- Hammill, A. (2018). *Repositorio de indicadores de adaptación. Casos reales de sistemas de monitoreo y evaluación nacionales*. s.l.: GIZ.
- Ilustre Municipalidad de Cuenca (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca*. Cuenca.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo de la Republica del Ecuador (2010). *Censo poblacional del 2010*. Quito.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate Change: The Physical ScienceBasis.* http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf
- Jiménez, S. (2018). Estimación de la Vulnerabilidad de los riesgos del cambio climático en una cuenca de montaña. [En línea] http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30399
- Ministerio del Ambiente de la Republica del Ecuador (2018). *Proyecto Andino de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático sobre el Agua*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, MAE (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático.* Quito: Ecuador.
- Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, Proyecto PACC (2009). *Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute, Jubones, Catamayo, Chone, Portoviejo y Babahoyo*. Proyecto PACC. Quito.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, (2017). *Proyecto de Ganadería Climáticamente Inteligente (GCI): Reporte Metodológico*. Quito.
- Quishpe, D. (2017). *Sistematización de experiencias de adaptación al cambio climático desarrolladas a nivel de cuencas hidrográficas en el Ecuador.* Turrialba.
- Secretaria Nacional del Agua de la República del Ecuador (2009). *Delimitación y codificación de unidades hidrológicas en el Ecuador al 1:250000.* http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/delimitacion-codificacion-Ecuador.pdf

PREDICCIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE TORMENTAS DE DISEÑO Y CAMBIOS EN EL TERRITORIO EN CINCO CUENCAS HIDROLÓGICAS (SE ESPAÑA)

Antonio Jódar Abellán
Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, España
antonio.jodar@ua.es

Javier Valdés Abellán
Departamento de Ingeniera Civil, Universidad de Alicante, España
javier.valdes@ua.es

Concepción Pla
Departamento de Ingeniera Civil, Universidad de Alicante, España
c.pla@ua.es

Miguel Ángel Pardo Picazo
Departamento de Ingeniera Civil, Universidad de Alicante, España
mpardo@ua.es

Pedro Jiménez Guerrero
Departamento de Física. Universidad de Murcia, España
pedro.jimenezguerrero@um.es

Daniel Prats Rico
Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales. Universidad de Alicante, España
prats@ua.es

RESUMEN

En este trabajo se analiza el efecto de una serie de tormentas de diseño que simulan la ocurrencia de los fenómenos hidrometeorológicos extremos denominados DANAS. Con éstas se evalúa la vulnerabilidad de cinco cuencas hidrológicas (localizadas en el municipio de Alicante, SE España) y especialmente de aquellos espacios de las mismas que han experimentado un incremento del uso de suelo urbano desde 1990 hasta la actualidad. Los efectos de las DANAS sobre el territorio, conocidos como "inundaciones repentinas", muestran en las desembocaduras al Mediterráneo de las cinco cuencas unos caudales que se incrementan en gran medida desde el escenario sin uso de suelo urbano (≈ 50 m^3/s, 190 m^3/s, 380 m^3/s) hasta el escenario con mayor urbanización (≈ 235 m^3/s, 385 m^3/s, 940 m^3/s respectivamente).

1. INTRODUCCIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

El cambio global incluye las modificaciones de las variables climáticas a nivel espacial y temporal, y los cambios derivados de los procesos terrestres, abarcando las actividades humanas que afectan al medio ambiente, y como tales, el cambio global proyectado incluye los sistemas de recursos hídricos (Green et al., 2011). En los últimos años, el cambio global (cambio climático, cambios de usos del

suelo, etc.) ha sido plenamente demostrado en numerosos estudios científicos (IPCC, 2013). La influencia antrópica sobre el medio ha alterado el clima de los últimos 25 años, de tal forma que las modificaciones registradas a escala planetaria no podrían atribuirse exclusivamente a las propias anomalías y variabilidad natural del sistema climático (Allen et al., 2000; Bindoff et al., 2013; Jerez et al., 2018).

Las inundaciones constituyen un claro ejemplo de la cada vez mayor influencia y alteración del citado cambio global en los elementos del medio ambiente, ya que, si bien se trata de fenómenos que el hombre ha sufrido a lo largo de su historia, en las últimas décadas se están registrando, a nivel global, episodios con mayor intensidad y frecuencia (Hirabayashi et al., 2008; IPCC, 2013), denominados en la literatura científica como "inundaciones repentinas o relámpago" (*flash flood* en inglés). En los medios de comunicación habitualmente se las relaciona con las DANAS (depresión aislada en niveles altos; Li et al., 2020). Paralelamente, la escasa ordenación del territorio ha permitido el desarrollo urbanístico en espacios sensibles a dichos fenómenos (llanuras de inundación, ramblas, depresiones del terreno, etc.) incrementando con ello el efecto de estos episodios "repentinos" sobre el hombre lo que ha provocado la pérdida de bienes materiales, vidas humanas, animales, etc. (Camarasa-Belmonte, 2016; Boongaling et al., 2018).

El presente trabajo se ha realizado sobre cinco cuencas hidrológicas, incluidas total o parcialmente en el municipio de Alicante (Sur Este de España), que cumplen las características enunciadas anteriormente: incremento del desarrollo urbanístico en espacios sensibles, a lo largo de las últimas décadas, junto con registro de fenómenos convectivos propios del Mediterráneo, recursivamente de mayor intensidad y frecuencia. Dichas cuencas se denominan: San Juan, Juncaret, Alicante Puerto, Oveja y Agua Amarga (Fig.1).

Debido al reducido tamaño que éstas presentan (de 10.2 km^2 en el caso de San Juan a 200.9 km^2 en la cuenca Oveja), junco con la estacionalidad de su régimen hidrológico (cauces efímeros) es frecuente encontrarlas en la literatura e informes relacionados denominadas como ramblizos (Jodar-Abellan et al., 2018, 2019).

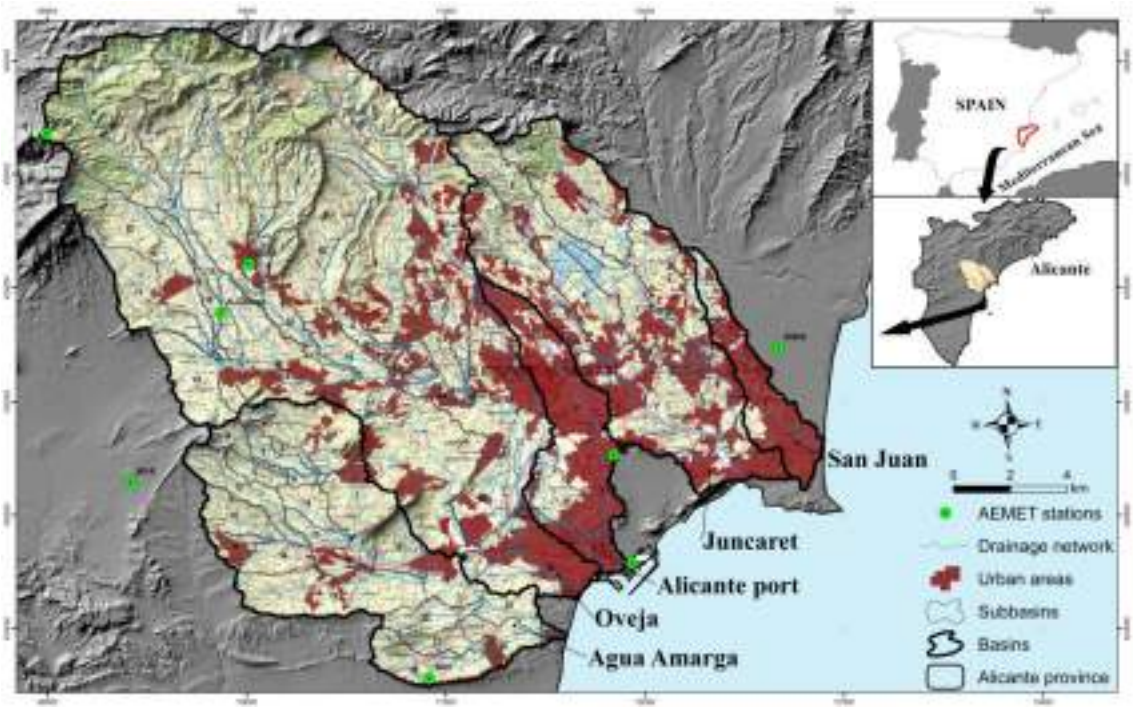


Figura 1. Cuencas hidrológicas estudiadas.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se implementó el código SWAT, de acceso abierto, a nivel subdiario con un *time step* de diez minutos (Jodar-Abellan et al., 2019). SWAT es un modelo hidrológico, de parámetros semidistribuidos, aplicado habitualmente a escala de cuenca con una resolución temporal diaria y subdiaria (Arnold et al., 1998; Gassman et al., 2014; Neitsch et al., 2011; Jeong et al., 2010). En las siguientes secciones se indica la información acoplada al modelo.

2.1. Datos espaciales y escenarios de usos del suelo

En primer lugar, para delimitar las cuencas y subcuencas que las integran, se incorporó en SWAT el modelo digital de elevación del terreno (MDE), en formato ráster con una grilla de 25m x 25m, junto con la red hidrográfica en formato *shapefile* (shp) con escala 1:25.000. Ambas fuentes de información, de acceso público (CNIG, 2017; MAPAMA, 2017), fueron pretratadas en *ArcGIS* antes de ser acopladas en SWAT, eliminando por ejemplo los endorreísmos para asegurar una correcta delimitación de la red de drenaje en SWAT (Tarboton et al., 1991).

Las subcuencas generadas fueron subdivididas en una serie de polígonos denominados, en este modelo, Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Así pues, en cada subcuenca, las URH nacen del solapamiento de la cartografía relativa a: 1-edafología procedente y adaptada de la base de datos HWSD (2017); 2-de las pendientes procedentes del MDE previo y divididas en 2 clases (0%-3% y >3%) siguiendo la norma 5.2-IC (BOE, 2016); y 3-de la cartografía de usos del suelo que pertenece en este trabajo al proyecto europeo *Corine Land Cover* (CLC) con escala 1:100.000 en formato shp (CNIG, 2017). Dicho proyecto presenta escenarios de usos del suelo para los años 1990, 2000, 2006 y 2012, cuyo periodo total (22 años) se considera adecuado para captar las principales alteraciones del territorio en las cuencas objeto de estudio. Además, se realizó un quinto escenario prístino o *baseline* (sin uso de suelo urbano).

2.2. Tormentas de diseño e información hidrometeorológica

En primer lugar, se calculó el tiempo de concentración (Tc), para cada cuenca, utilizando las ecuaciones empíricas propuestas por Neitsch et al., (2011). Para ello, se consideraron los canales principales y tributarios de aquellas subcuencas que definen el camino más largo (en la propagación del flujo) desde la cabecera a la desembocadura, en el Mediterráneo, de cada cuenca. San Juan presentó un Tc de 1.57 horas, Juncaret 2.41 h, Alicante Puerto 1.93 h, Oveja 4.59 h y Agua Amarga 2.76 h. Lógicamente estos Tc están relacionados con el tamaño de cada cuenca (Fig.1).

A partir de lo anterior, y considerando la información meteorológica de la estación 8025 (seleccionada ya que presenta registros diarios desde 1921 con escasas lagunas: Valdes-Abellan et al., 2017), se obtuvieron las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia: Koutsoyiannis et al. 1998) cuya expresión para la intensidad es la siguiente (Eq.(1)):

$$I = \frac{a \cdot T^{n}}{(T_c + b)^{m}} \qquad (1)$$

Donde I es la intensidad (mm/h); T el periodo de retorno (años); Tc el tiempo de concentración (h); a, n, b y m son coeficientes específicos obtenidos en la estación 8025 con la distribución de probabilidad acumulada de Gumbel (Fig.2).

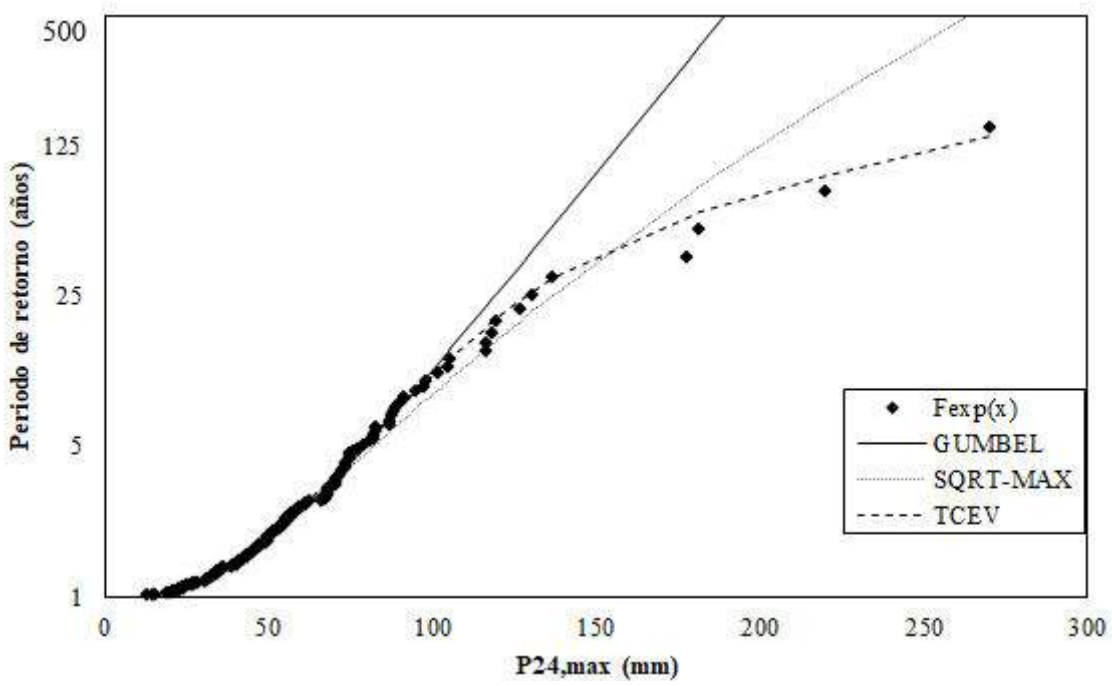
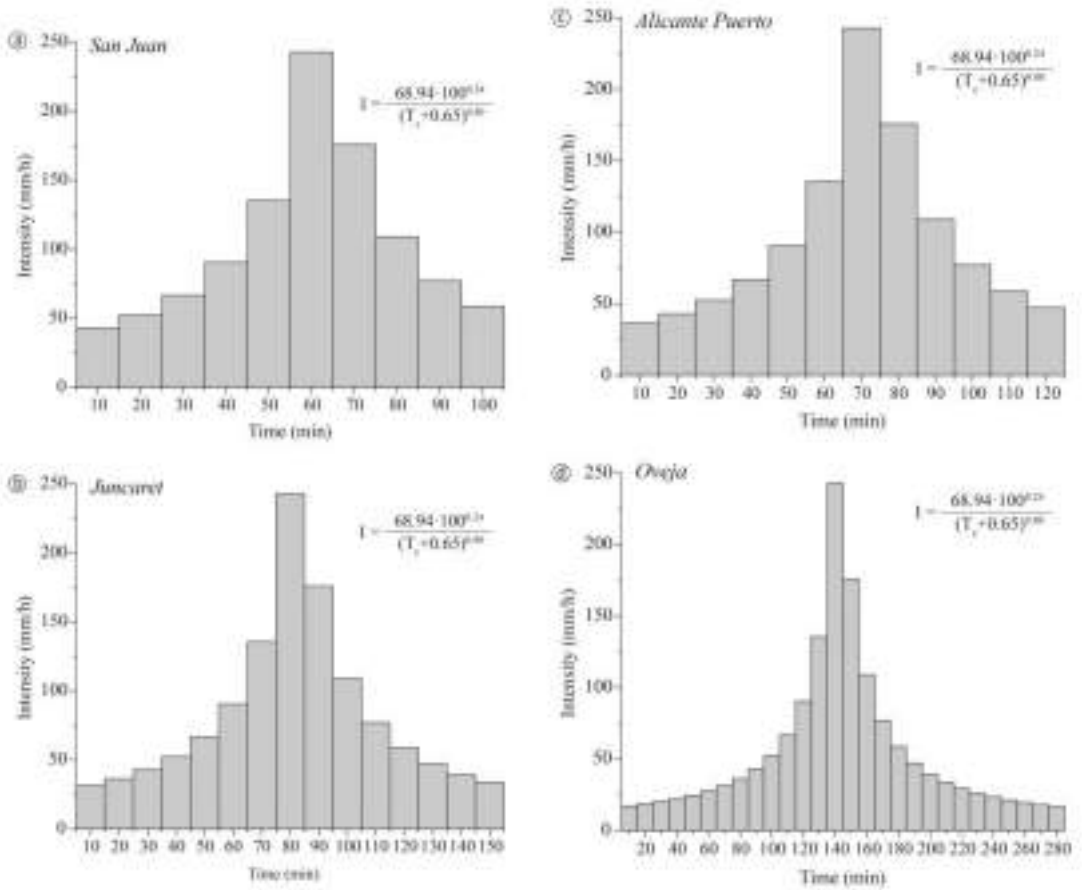


Figura 2. Funciones de probabilidad acumulada (Gumbel, SQRT-MAX, y TCEV) para diferentes periodos de retorno (hasta 500 años) en la estación 8025.

Por último, se obtuvo la lluvia sintética, para cada cuenca, siguiendo el método de los bloques alternos no simétricos (Chow et al., 1988) cuyas intensidades se muestran en la Fig.3 considerando un *T* de 100 años y un *time step* de diez minutos.



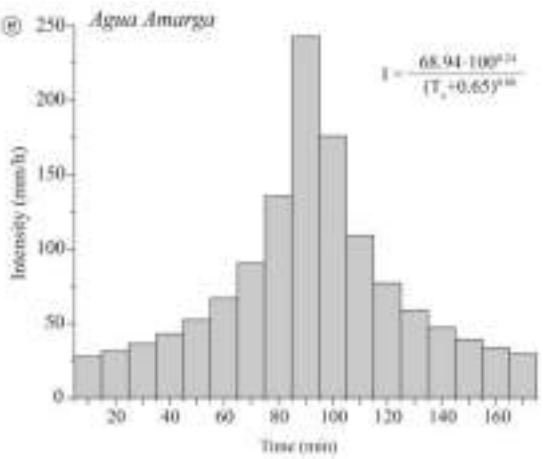


Figura 3. Intensidades de las tormentas de diseño calculadas para cada cuenca.

Junto con las series de precipitación, obtenidas con las tormentas de diseño, SWAT requiere información diaria de temperatura máxima y mínima, humead relativa, velocidad del viento y radiación solar (Winchell et al., 2013). Los registros diarios de temperatura fueron obtenidos de las estaciones contenidas en la Fig.1, las cuales no poseen datos diarios de humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar. Por ello, se utilizó CLIGEN, el generador de datos climáticos de SWAT, al que se le suministraron datos de 14 parámetros hidrometeorológicos a nivel mensual (procedentes de la estación ALC20wgn, Fig.1).

2.3. Escorrentía superficial, propagación de la avenida y velocidad del flujo

En SWAT, la conversión lluvia-escorrentía se realizó con el *Green-Ampt Mein-Larson excess rainfall method* (Jeong et al., 2010). La propagación de la avenida en los cauces principales y tributarios se simuló con el método de Muskingum (Cunge, 1969), mientras que la ecuación de *Manning* para el flujo uniforme (Manning et al., 1977) se usó para calcular el ratio y velocidad del flujo en los citados canales y sobre el terreno. Información detallada puede ser obtenida en Jodar-Abellan et al., (2019).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

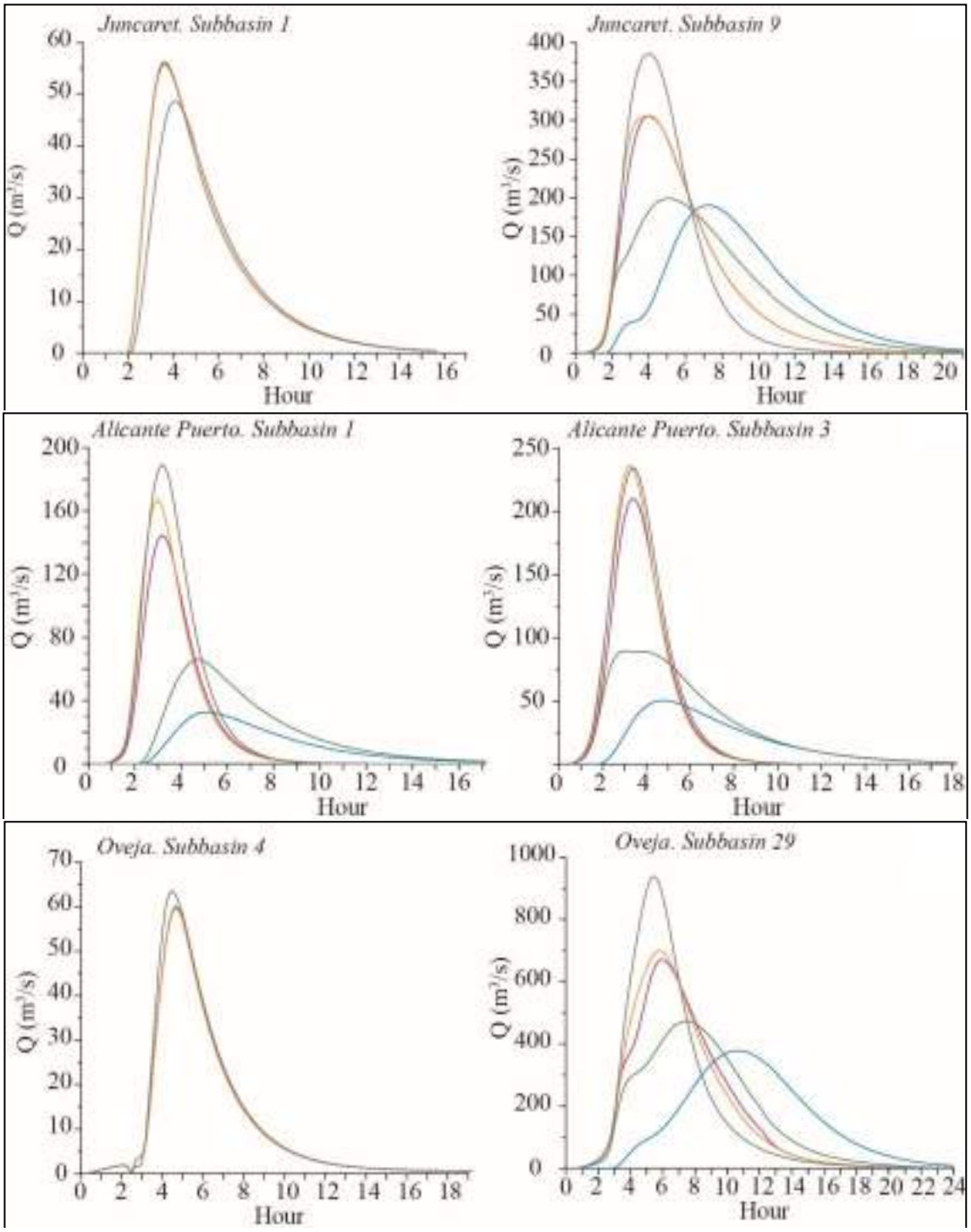
3.1. Variación temporal y espacial de las descargas

En la Fig.4 se muestran los hidrogramas registrados en las subcuencas de cabecera y salida para cada cuenca. Cabe destacar:

i) La correcta propagación de la onda de avenida, ya que las subcuencas de salida se comportan como sumidero del caudal registrado en las subcuencas localizadas aguas arriba. Ello puede observarse, por ejemplo, en Juncaret donde los picos de escorrentía alcanzan en torno a 57 m^3/s en la cabecera (*subbasin* 1) y unos 375 m^3/s en la desembocadura (*subbasin* 9).

ii) El incremento del tiempo de tránsito de los hidrogramas, desde cabecera a desembocadura, a medida que disminuye el uso de suelo urbano. Continuando con Juncaret, en la subcuenca de cabecera el pico de escorrentía se alcanza a las 4 horas desde el comienzo de la tormenta, siendo el hidrograma practicamente similar en todos los escenarios dado que esa subcuenca (la de cabecera) no presenta uso de suelo urbano en ningún escenario. Sin embargo, en la subcuenca de salida, localizada en plena línea de costa, el pico de escorrentía se alcanza a las 8 horas y a las 5.5 horas, en los escenarios prístino y CLC1990 respectivamente, desde el inicio de la lluvia, es decir, 3 horas y 1.5 horas después con respecto a sus escenarios homólogos en la subcuenca de cabecera.

Además, en la desembocadura, ambos escenarios (prístino y CLC1990), presentan picos de caudales menores (en torno a 175 m^3/s) que el resto de los escenarios con mayor uso de suelo urbano (unos 375 m^3/s). Esto último, también identificado en el apartado anterior, se debe a que a medida que aumenta la tasa de impermeabilización del terreno (mayor uso urbano), la infiltración del agua en el subsuelo es menor. En esta situación, SWAT convierte prácticamente toda la lluvia en escorrentía superficial (números de curva en torno a 90). Sin embargo, al aumentar los usos agrícolas y forestales (escenarios prístino y CLC1990), la recarga a los acuíferos superficiales y profundos (según la terminología de SWAT) se incrementa. Ello resulta especialmente relevante en el caso de los acuíferos profundos ya que no presentan flujo de retorno a los cursos de agua superficiales.



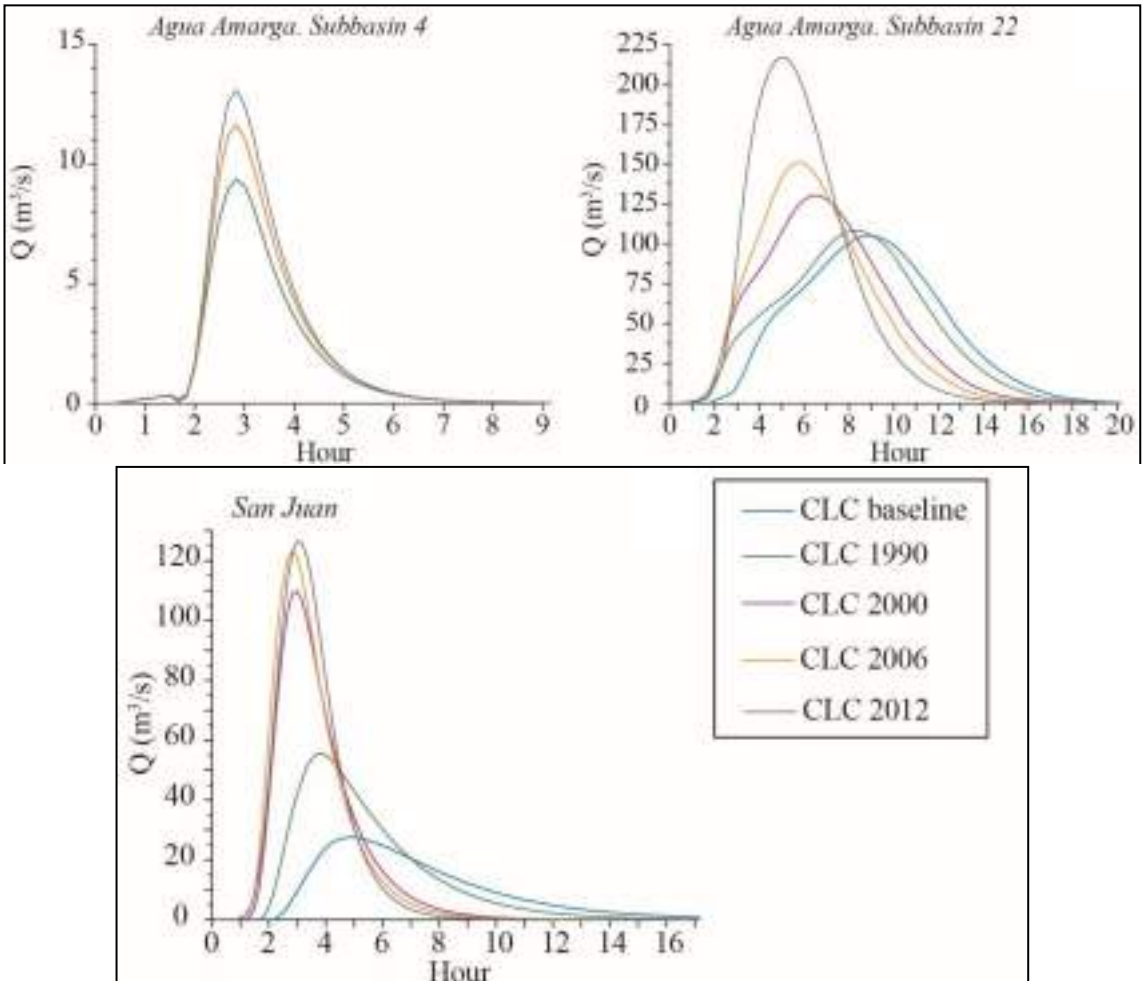


Figura 4. Hidrogramas en la subcuenca de cabecera (izquierda) y en la salida al Mediterráneo (derecha), para cada cuenca estudiada, en los cinco escenarios de usos del suelo fijados. Nota: San Juan, debido a su reducido tamaño, sólo posee una subcuenca.

3.2. Variación en la propagación de los picos de escorrentía

En este apartado se analizan las diferencias espaciales registradas entre las cinco cuencas, para los escenarios prístino y CLC2012, en cuanto a los picos de escorrentía. En concreto, dichos escenarios fueron seleccionados por ser los que presentan mayores diferencias entre sí (Fig.5). Debe destacarse que no se está mostrando el hidrograma completo, como en el apartado anterior, sino únicamente el pico (el máximo caudal) registrado en cada subcuenca, circunstancia que evidentemente ocurre en un instante diferente, desde el inicio de la tormenta en cada subcuenca y escenario considerado.

Así pues, los picos de escorrentía incrementan su caudal a medida que viajan a lo largo de las subcuencas hidrológicamente conectadas hasta alcanzar la desembocadura al Mediterráneo de cada cuenca. Dichas salidas obtuvieron, respectivamente, en los escenarios prístino y CLC2012: 105.1 m^3/s y 216.7 m^3/s en Agua Amarga; 378.4 m^3/s y 938.1 m^3/s en Oveja; 50.3 m^3/s y 234.3 m^3/s en Alicante Puerto; 190.5 m^3/s y 385.9 m^3/s en Juncaret; 27.5 m^3/s y 126.6 m^3/s en San Juan. Estos resultados (consecuencia directa de los tamaños de las cuencas, usos del suelo, números de curva, tormentas de diseño, etc.) coinciden con las aproximaciones realizadas en numerosos estudios e informes técnicos, para la provincia de Alicante, en el marco del Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA) desarrollado en este territorio desde el año 2003 (PATRICOVA, 2015).

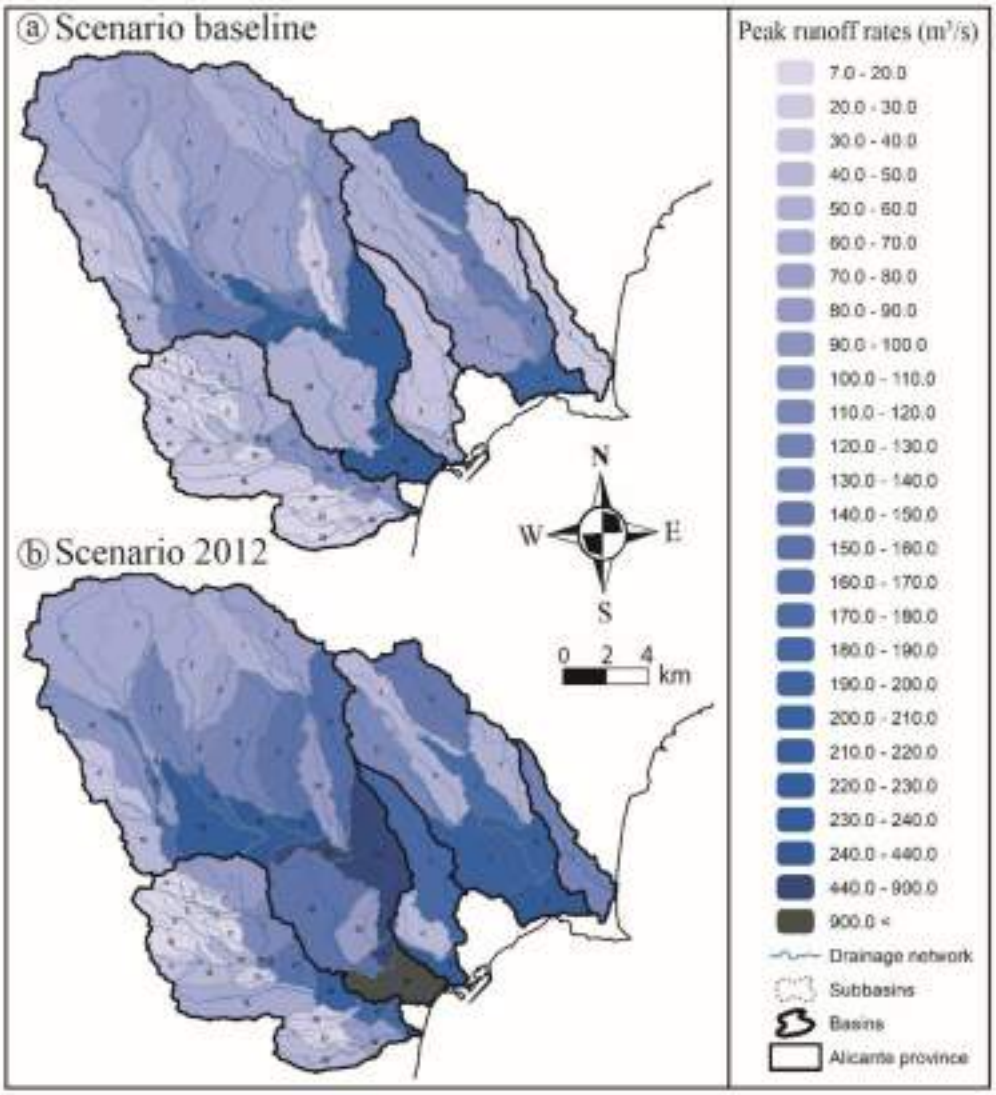


Figura 5. Propagación de los picos de escorrentía (*peak runoff rates* en inglés) en las cinco cuencas estudiadas para los escenarios prístino (*baseline* en inglés) y CLC2012.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo se indican a continuación:

- En las cuencas estudiadas se observa un claro aumento del uso de suelo urbano desde 1990 hasta 2012.
- Dicho incremento se traduce en una mayor tasa de impermeabilización del terreno y por ende de los caudales registrados ante una lluvia (en este caso una tormenta de diseño para simular el caso extremo: una inundación repentina).
- Dado que las cinco cuencas analizadas no presentan ninguna estación de aforo resulta aún mas esencial, si cabe, la transferencia de los resultados obtenidos entre los diferentes organismos dedicados al estudio de las inundaciones históricas y actuales (inundaciones repentinas o *flash floods* en inglés).
- Dicho contacto y transferencia de resultados resulta esencial para poder dimensionar y ubicar adecuadamente las obras de contección frente a inundaciones (parques inundables, tanques de tormenta, etc.), así como para desarrollar las medidas de concienciación y percepción del riesgo necesarias.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado se incluye en las actividades de difusión científica realizadas desde la Cátedra del Agua de la Universidad de Alicante (https://catedradelaguaua.org/). Del mismo modo, esta contribución se enmarca parcialmente en el proyecto GRE17-12 (Universidad de Alicante). Adicionalmente, el primer autor agradece la financiación recibida del Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario (FPU) concedida por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades.

REFERENCIAS

- Allen, M. R., Stott, P. A., Mitchell, J. F. B., Schnur, R. & Delworth, T.L. (2000). Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*, 407, 617-620. https://doi.org/10.1038/35036559
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73-89.
- Bindoff, N. L., Stott, P. A., Achutarao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I. I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R. & Zhang, X. (2013). Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. In: T. F. Stocker, D. Qin, G-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter10_FINAL.pdf
- BOE. (2016). *Proyecto de Orden Ministerial por la que se aprueba la Norma 5.2-IC Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras*. Boletín Oficial del Estado (BOE), nº 60. Ministerio de Fomento.
- Boongaling, C. G. K, Faustino-Eslava, D. V. & Lansigan, F. P. (2018). Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land Use Policy,* 72, 116-128.
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 541, 99-115.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. Singapore.
- CNIG. (2017). Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid.
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum Method). *Journal of Hydraulic Research,* 7, 205-230.
- Gassman, P. W., Sadeghi, A. M. & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT model special section: Overview and insights. *Journal of Environmental Quality,* 43, 1-8.
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H. & Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3), 532-560. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002
- Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T. & Kimoto, M. (2008). Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate, *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 754-772. https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.754
- HWSD (2017). Harmonized World Soil Database, Laxemburg (Austria).
- IPCC - Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. M. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*

on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf.

- Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L. & Srinivasan, R. (2010). Development and integration of sub-hourly rainfall–runoff modeling capability within a watershed model. *Water Resources Management,* 24, 4505-4527.
- Jerez, S., Lopez-Romero, J. M., Turco, M., Jimenez-Guerrero, P., Vautard, R. & Montávez, J. (2018). Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. *Nature communications*, 9(1), 1304. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03527-y
- Jodar-Abellan, A., Valdes-Abellan, J., Pla, C. & Gomariz-Castillo, F. (2018). Temporal evolution of urban growth and its impact on runoff rates generation. *International Journal of Sustainable Development and Planning,* 13(7), 975-984. https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N7-975-984.
- Jodar-Abellan, A., Valdes-Abellan, J., Pla, C. & Gomariz-Castillo, F. (2019). Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Science of The Total Environment,* 657, 1578-1591. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.034.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration frequency relationships. *Journal of Hydrology,* 206, 118-135.
- Li, X., Xia, X., Zhong, S., Luo, L., Yu, X., Jia, J., Zhao, K., Li, N., Liu, Y. & Ren, Q. (2020). Shallow foehn on the northern leeside of Tianshan Mountains and its influence on atmospheric boundary layer over Urumqi, China-A climatological study. *Atmospheric Research*, 240, 104940. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104940.
- Manning, M. J., Sullivan, R. H. & Kipp, T. M. (1977). *Vol. III: Characterization of discharges. Nationwide evaluation of combined sewer overflows and urban stormwater discharges*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- MAPAMA (2017). *Tramos de ríos de España clasificados según Pfafstetter modificado*. MAPAMA, Madrid.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool. Theorical Documentation*. Version 2009. Texas Water Resources Institute, Texas.
- PATRICOVA. (2015). *Plan de acción territorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)*. Dirección General de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje. Generalitat Valenciana.
- Tarboton, D.G, Bras R.L & Rodriguez-Iturbe I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes,* 5, 81-100.
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A. y Tenza-Abril, A. J. (2017). Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology,* 37, 1285-1296.
- Winchell, M., Srinivasan, R. S., Di Luzio, M. y Arnold, J. G. (2013). *ArcSWAT Interface for SWAT2012. User's Guide*. Texas Water Resources Institute, Texas.

ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE CAUDALES MÁXIMOS DE AVENIDA EN EL TRAMO TORO-ZAMORA: POSIBLE INCIDENCIA DE LA SINUOSIDAD DEL RÍO DUERO EN LA LAMINACIÓN DE LAS PUNTAS DE CRECIDA

José Fernando Muñoz Guayanay
Prefectura de Loja, Ecuador
jfmunoz@prefecturaloja.gob.ec

Carolina Guardiola Albert
Instituto Geológico y Minero de España, España
c.guardiola@igme.es
https://orcid.org/0000-0001-9352-7618

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

RESUMEN

El 'Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables' contiene los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación para las márgenes de los principales ríos españoles, así como los cuantiles de caudales máximos para diferentes periodos de retorno. En las grandes cuencas fluviales (>500 km^2) los caudales punta de diseño se estiman con modelos de regresión, siendo la superficie de la cuenca drenante la única variable significativa. Por ello el caudal máximo estimado para el río Duero a su paso por Zamora (situada aguas abajo) es mayor que el estimado para Toro. En cambio, eventos significativos (Q>200 m^3/s) registrados recientemente muestran que el caudal que se registra en Toro es mayor que el de Zamora. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de recalcular los caudales máximos, con el objetivo de mejorar la estimación de cuantiles y las cartografías de peligrosidad y riesgo de ellos derivados, para las cuatro 'Áreas con riesgo potencial significativo de inundación' existentes en el tramo de río Duero ubicado entre ambas localidades. Para ello, el presente estudio ensaya las técnicas geoestadísticas (*STARS*) combinadas con sistemas de información geográfica (*ArcGIS*) y rutinas en el entorno de programación *R*, utilizando variables morfométricas, como la sinuosidad del cauce.

1. INTRODUCCIÓN

Todas las medidas de mitigación de los daños por avenidas e inundaciones (predictivas, preventivas y correctoras) precisan previamente de un análisis de riesgo, donde se estudia la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad para su posterior integración. Los estudios de peligrosidad por inundaciones basados en métodos hidrológico-hidráulicos, siendo los más comunes, persiguen la determinación de las áreas inundables y las variables hidráulicas de la inundación (velocidad y calado, principalmente) para diferentes condiciones de tránsito de avenidas, caracterizadas por la probabilidad de ocurrencia o período de retorno. En España, estos estudios y cartografías de peligrosidad y riesgo, preceptivos a partir de la Directiva europea de gestión del riesgo de inundación

60/2007, están contenidos en el 'Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables' (SNCZI); que además permite visualizar los valores de los caudales máximos (CauMax; CEDEX, 2013) para diferentes periodos de retorno en distintos puntos de la red fluvial. Este último trabajo fue efectuado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), y la metodología empleada está desarrollada en la 'Memoria Técnica del Mapa de Caudales Máximos' (CEDEX, 2011). Para el caso de las grandes cuencas fluviales peninsulares (mayores a 500 km^2), en la estimación de los caudales punta de diseño se ha empleado un modelo de regresión para los ejes fluviales principales (ríos) en los cuales, para la obtención de caudales máximos, solo se toma en cuenta, como variable significativa, la superficie de la cuenca drenante que se tiene aguas arriba hasta cada punto de interés (CEDEX, 2011). Esta simplicidad en el cálculo de los caudales de diseño para la delimitación de las zonas inundables justifica la necesidad de estudios de calibración y validación de las estimaciones; así como la propuesta de otras alternativas más objetivas y científicamente fundamentadas en el caso de que se observen errores e incertidumbres en su aplicación.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Zamora (comunidad autónoma de Castilla y León), ubicada entre el centro-noroeste de la península Ibérica. Concretamente en el tramo de río Duero comprendido entre las ciudades de Toro y Zamora (capital de la provincia homónima), con una longitud aproximada de 37 km, medidos sobre el cauce del río Duero (Fig. 1).

Para este tramo del río Duero, el visor del SNCZI permite observar y extraer los mapas y valores de caudales máximos para distintos periodos de retorno y, derivado de ellos, las áreas inundables, mapas de peligrosidad (calados) y riesgo de inundación. Como se puede observar en la Tabla 1, los valores de cuantiles estimados son siempre superiores en Zamora (con más cuenca drenante) que en Toro (con menos cuenca aguas arriba), debido a que sólo se ha empleado el área de la cuenca como variable morfométrica de estimación.

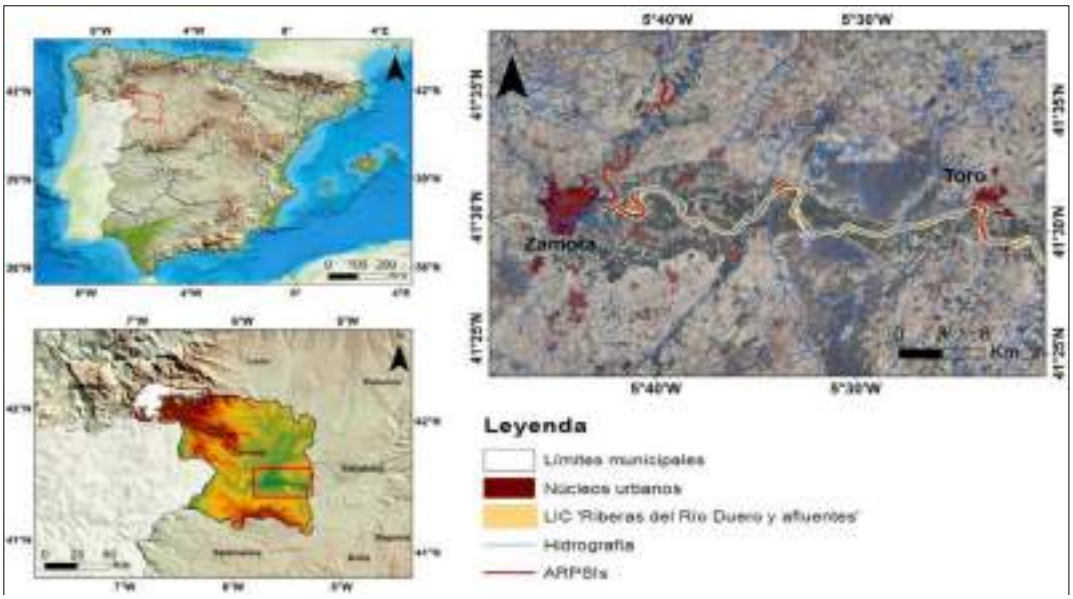


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio. Fuente: proyecto DRAINAGE.

Localidad	Cuenca drenante (km^2)	Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno (T, en años)					
		T=2	T=5	T=10	T=25	T=100	T=500
Toro	41655	744	1429	1975	2789	4311	6703
Zamora	46226	767	1509	2110	3013	4732	7505

Tabla 1. Cuantiles de caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno en la posición de las estaciones de aforo de Toro y Zamora. Fuente: CauMax (SNCZI).

EVENTOS 2018				EVENTOS 2019				EVENTOS 2020		
Fecha	Toro	Zamora		Fecha	Toro	Zamora		Fecha	Toro	Zamora
07/03	488,4	441,60		02/04	467,75	388,18		03/02	220,0	220,0
13/03	726,8	635,90		25/11	211,80	191,00		21/03	198,0	188,0
17/03	806,4	706,50		03/12	317,60	326,00		16/04	318,0	334,0
13/04	767,0	602,26		23/12	1142,40	1088,0		21/04	351,0	365,0
18/04	686,6	550,88						29/04	280,0	295,0

Tabla 2. Caudales punta registrados en eventos recientes significativos (Q>200 m^3/s) en las estaciones de aforos de Toro y Zamora. Fuente: SAIH-ROEA CHD (datos extraídos de la página web en tiempo real; pendientes de validación).

En base a la observación de más de una docena de eventos significativos (Q>200 m3/s) registrados recientemente (2018-2020) procedentes de datos de la ROEA y el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD; pendientes de validación) se evidencia precisamente todo lo contrario a las estimaciones del SNCZI, que el caudal que se registra en la estación de Toro es mayor que el de Zamora (Tabla 2). Este hecho pone de manifiesto la necesidad de recalcular los caudales máximos con el objetivo de poder determinar la validez e incertidumbre de estos valores para cada periodo de retorno. Esto, además, implicaría que las áreas inundables cartografiadas por el SNCZI en el tramo del río Duero entre Toro y Zamora puedan variar en futuros ciclos de revisión del SNCZI.

3. METODOLOGÍA

La metodología de análisis estadístico y geoestadístico de los caudales máximos (Fig.2) combina el uso de datos de caudales de crecida de estaciones de aforo (Qc y Qci), datos de las estimaciones del SNCZI para comparación, y diversa información geoespacial (básica topográfica y temática). Como métodos se emplea desde el clásico análisis de frecuencias de caudales de avenida con modelos estadísticos univariados (aplicación CHAC), hasta métodos geoestadísticos soportados por sistemas de información geográfica (ArcGIS), aplicaciones de interpolación específicas (STARS) y rutinas en entorno de programación R.

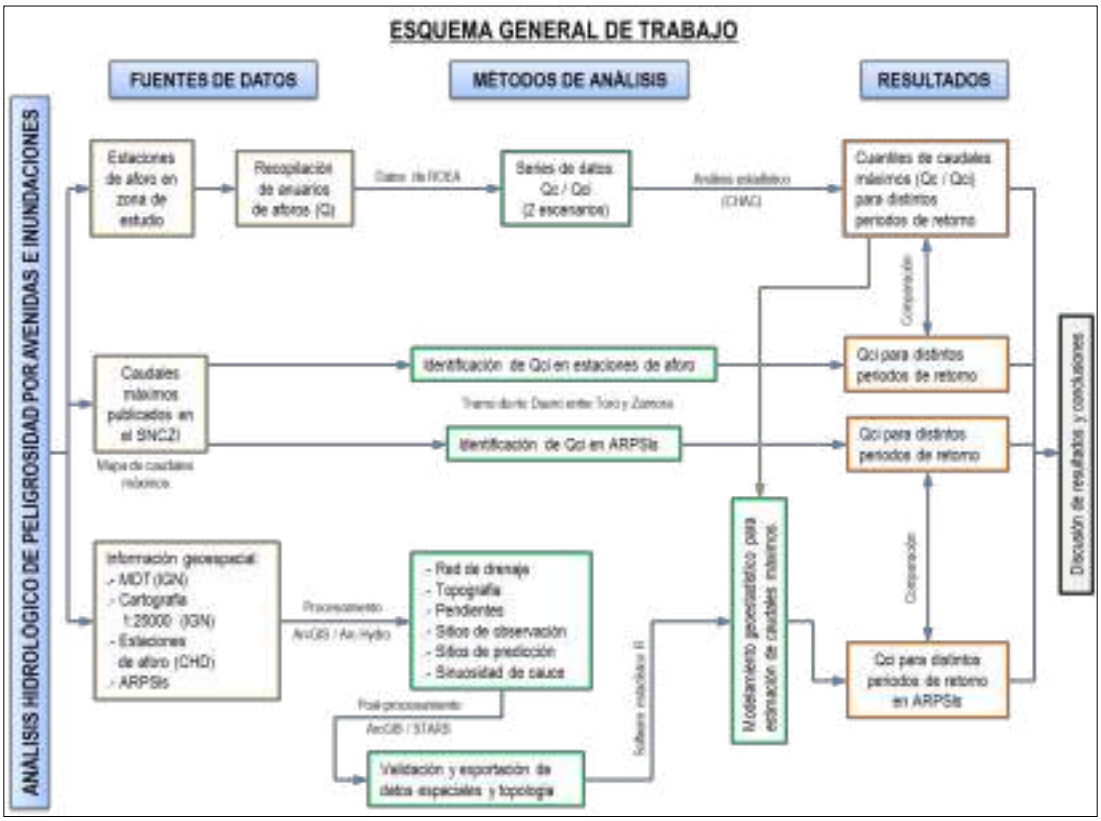


Figura 2. Esquema metodológico general, desde las fuentes de datos a los resultados, pasando por las metodologías y técnicas de análisis.

3.1. Análisis estadístico de caudales de avenida

Los datos hidrológicos en el tramo del río Duero en estudio corresponden fundamentalmente a las estaciones de aforo de Toro (código 2062) y Zamora (código 2121), ambas gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). A partir del visor del 'Sistema Nacional de Anuario de Aforos', se consultó la base de datos de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) para recopilar las series anuales de datos de caudales máximos medios diarios (Qc) y caudales máximos instantáneo (Qci) disponibles para ambas estaciones (Tabla 3).

Estación	Caudal máximo	Años con datos	Años con datos completos	Periodo total de datos
2062 Río Duero en Toro	Caudal máximo medio diario (Qc)	104	76	1911-1912 a 2014-2015
	Caudal máximo instantáneo (Qci)	44	42	1954-1955 a 2014-2015
2121 Río Duero en Zamora	Caudal máximo medio diario (Qc)	13	12	2002-2003 a 2014-2015
	Caudal máximo instantáneo (Qci)	13	12	2002-2003 a 2014-2015

Tabla 3. Periodo de datos de caudales máximos recopilados de las estaciones de aforo de Toro y Zamora. Fuente: ROEA CHD.

Al ver la diferencia de la longitud de los periodos de datos de caudales máximos, se plantearon dos escenarios de análisis de datos (Tabla 4): 1) series con datos completos para cada estación de aforo; 2) series con datos completos para los años hidrológicos comunes entre ambas estaciones.

Escenario	Caudal máximo	Estación	Periodo
Escenario 1	Caudal máximo medio diario (Qc)	Toro	1912 - 2015
		Zamora	2003 - 2015
	Caudal máximo instantáneo (Qci)	Toro	1954 - 2015
		Zamora	2003 - 2015
Escenario 2	Caudal máximo medio diario (Qc)	Toro	2003 - 2015
		Zamora	2003 - 2015
	Caudal máximo instantáneo (Qci)	Toro	2003 - 2015
		Zamora	2003 - 2015

Tabla 4. Periodo de datos temporales analizados para cada escenario, estación y datos de caudales máximos.

Mediante la aplicación *CHAC* (CEDEX, 2013) y sus modelos estadísticos combinando funciones de distribución de frecuencias y métodos de estimación de parámetros, se realizaron los análisis estadísticos de las distintas series de caudales máximos medios diarios (Qc) y caudales máximos instantáneos (Qci) de las estaciones Toro y Zamora para la determinación de sus cuantiles para distintos periodos de retorno (10, 50, 100 y 500 años) en los dos escenarios temporales planteados.

3.2. Geoestadística de caudales máximos

La geoestadística es una rama de la estadística que desarrolla diversos procedimientos de estimación y simulación, utilizados para estudiar variables distribuidas espacialmente a partir de una cantidad de muestras en distintas localizaciones. Su objetivo principal consiste en estimar valores de esa variable en puntos no medidos a partir de los datos (en este caso, caudales máximos de crecida), buscando minimizar el error de estimación.

Para el procesamiento de la información geoespacial se empleó la aplicación informática ArcGIS (ESRI Geosystems) y las extensiones Arc Hydro Tools (herramientas para análisis de cartografía hidrológica) y STARS (Spatial Tools for the Analysis of River Systems). Posteriormente se exportó al software R para efectuar el modelamiento geoestadístico mediante el código SSN (Spatial Stream Network). Mediante el empleo de la extensión Arc Hydro Tools para ArcGIS, se realizó el procesamiento del MDT para definir la red de drenaje de la zona de estudio, así como también determinar sus parámetros morfométricos (longitud de cauce, sinuosidad y pendiente). Con la cartografía y ortofoto de la zona de estudio se pudo identificar la correspondencia existente entre la red de drenaje generada y la observada, y de igual forma fueron útiles para la elaboración de mapas temáticos.

La extensión para *ArcGIS* 'STARS' (*Spatial Tools for the Analysis of River Systems*), es un conjunto de herramientas espaciales para el análisis de sistemas fluviales (Ver Hoef *et al.*, 2006 y 2014; Ver Hoef y Peterson, 2010). Para ajustar un modelo de red de flujo espacial se requiere de datos de topología de la red de flujo (*Stream reaches*) y sitios de muestreo que corresponden a puntos de observación y puntos de predicción. Los puntos de observación son puntos que se ubican en la red de drenaje y que almacenan información conocida. En el presente trabajo los puntos de observación son las dos estaciones de aforo (Toro y Zamora) donde se dispone de caudales máximos instantáneos (Qci) para los distintos periodos de retorno en estudio (resultado del análisis estadístico del escenario 1).

Ante la imposibilidad de aplicar herramientas geoestadísticas con sólo dos puntos aforados en la zona de estudio, también se consideraron como puntos de observación los sitios equidistantes cada kilómetro en el tramo de río Duero entre la zona de Toro y Zamora (59 puntos). En estos puntos los valores de Qci se obtuvieron gracias a un análisis matemático que correlacionaba Qci con la sinuosidad del cauce. La sinuosidad se determinó para cada sitio con una media móvil de la sinuosidad aguas arriba. De esta forma, se pudieron ajustar los valores de Qci en los puntos de las estaciones Toro y Zamora (para cada periodo de retorno estudiado), y a partir de este ajuste se generaron valores hipotéticos de Qci en cada punto de observación establecido. Esta forma indirecta de obtener valores observados de Qci permitió poner a punto la metodología del cálculo de caudales máximos mediante técnicas geoestadísticas. Pero es necesario remarcar que las incertidumbres asociadas a los valores obtenidos serán importantes, y que su estimación excede los objetivos de este trabajo. Finalmente, los puntos de predicción corresponden a los cinco sitios representativos de las Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI, en adelante), en donde se desea determinar la variable Qci. En la Fig. 3 se presenta el mapa base de la zona de estudio y los sitios correspondientes a los puntos de observación y de predicción.

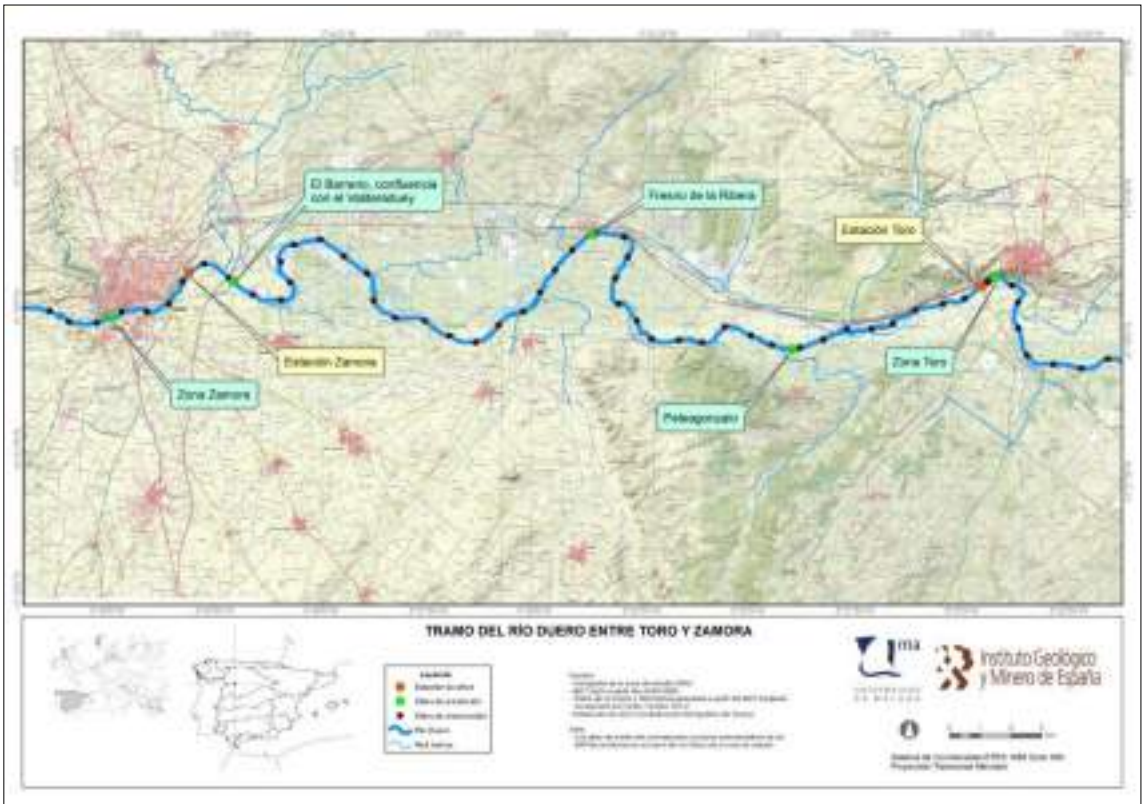


Figura 3. Mapa base de zona de estudio y situación de los puntos de observación y predicción.

Para exportar de la información geoespacial, la extensión *STARS* crea un objeto ".ssn" (*Spatial Stream Network* / red de flujo espacial), que contiene los datos espaciales y la topología de la red en un formato en el que se puede analizar de manera eficiente en el *software* estadístico *R* utilizando el paquete S*patial Stream Network* (*SSN*). El paquete *SSN* permite a los usuarios: 1) importar y almacenar sus datos espaciales en *R*; 2) calcular distancias por pares y pesos espaciales basados en la topología de red; 3) ajustar los modelos estadísticos espaciales para transmitir datos en los que la autocorrelación se basa en tres relaciones espaciales (euclidiana, flujo-conectado y flujo-desconectado); 4) estimar las relaciones entre las variables de flujo (regresión espacial); 5) hacer predicciones en ubicaciones no observadas (sitios de predicción); 6) exportar datos espaciales para su uso en otros programas de software; y 7) visualizar los datos espaciales (Ver Hoef *et al*., 2014).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del análisis estadístico de caudales

De todas las funciones de distribución de frecuencia aplicadas en el estudio, la función GEV por el método de estimación de parámetros de Momentos Ponderados es la que proporciona un mejor ajuste, tanto visual-gráfico como numérico (Tabla 5).

Escenario	Caudal máximo	Estación	Tr = 10	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 500
Escenario 1	Caudal máximo medio diario (Qc)	Toro	1437	2214	2569	3456
		Zamora	1150	1867	2228	3222
	Caudal máximo instantáneo (Qci)	Toro	1472	2451	2947	4321
		Zamora	1230	1945	2291	3211
Escenario 2	Caudal máximo medio diario (Qc)	Toro	1221	1994	2385	3466
		Zamora	1150	1867	2228	3222
	Caudal máximo instantáneo (Qci)	Toro	1329	2147	2555	3667
		Zamora	1230	1945	2291	3211

Tabla 5. Cuantiles estimados por la función GEV – Momento Ponderados. Tr: periodo de retorno expresado en años. Caudales expresados en m^3/s.

4.2. Resultados de la modelación geoestadística de caudales máximos

Mediante la aplicación del *software* R, se importó y realizó la modelación geoestadística en la red de drenaje, donde se determinaron los caudales máximos instantáneos (Qci) estimados para los sitios de predicción, que corresponden a puntos representativos en las zonas definidas como ARPSI dentro del tramo de rio Duero entre Toro y Zamora. Por medio de la función '*glmssn'* del *software R* se usó como una variable de respuesta al Qci modelado para los distintos periodos de retorno en estudio. Se incluyó como covariables la elevación (*Elev_m*), pendiente (*Slope*) y sinuosidad (*Sinuosidad*). Se tomaron en cuenta estas covariables puesto que la hidráulica fluvial clásica nos dice que el caudal depende fundamentalmente de este tipo de parámetros morfométricos del cauce. Estos parámetros pueden influir especialmente sobre los caudales punta que pueden circular por el tramo de río en estudio, que presenta un tren continuo y regular de meandros entre Toro y Zamora. Se aplicaron cinco modelos geoestadísticos para ser comparados entre sí. La estimación de caudales máximos para los diferentes periodos de retorno muestra que todos los modelos funcionan bien. Basándonos en el Criterio de información de Akaike (AIC), se consideró el bajo valor de AIC y el bajo error de predicción de R-cuadrado, seleccionando como modelo final, el que utiliza estructuras de covarianza *Spherical tailup* y *Spherical taildown*. La Tabla 6 y la Fig.4 recogen un resumen de los resultados de Qci para cada periodo de retorno estudiado en los sitios de predicción.

Sitio de predicción	Tr = 10	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 500
Zona de Toro	1694	2934	3585	5444
Peleagonzalo	2149	3999	5059	8172
Fresno de la Ribera	1304	2092	2482	3519
El Barreno, confluencia con el Valderaduey	1028	1540	1774	2344
Zona de Zamora	1855	3308	4084	6355

Tabla 6. Caudales máximos instantáneos (m^3/s) estimados para los sitios de predicción.

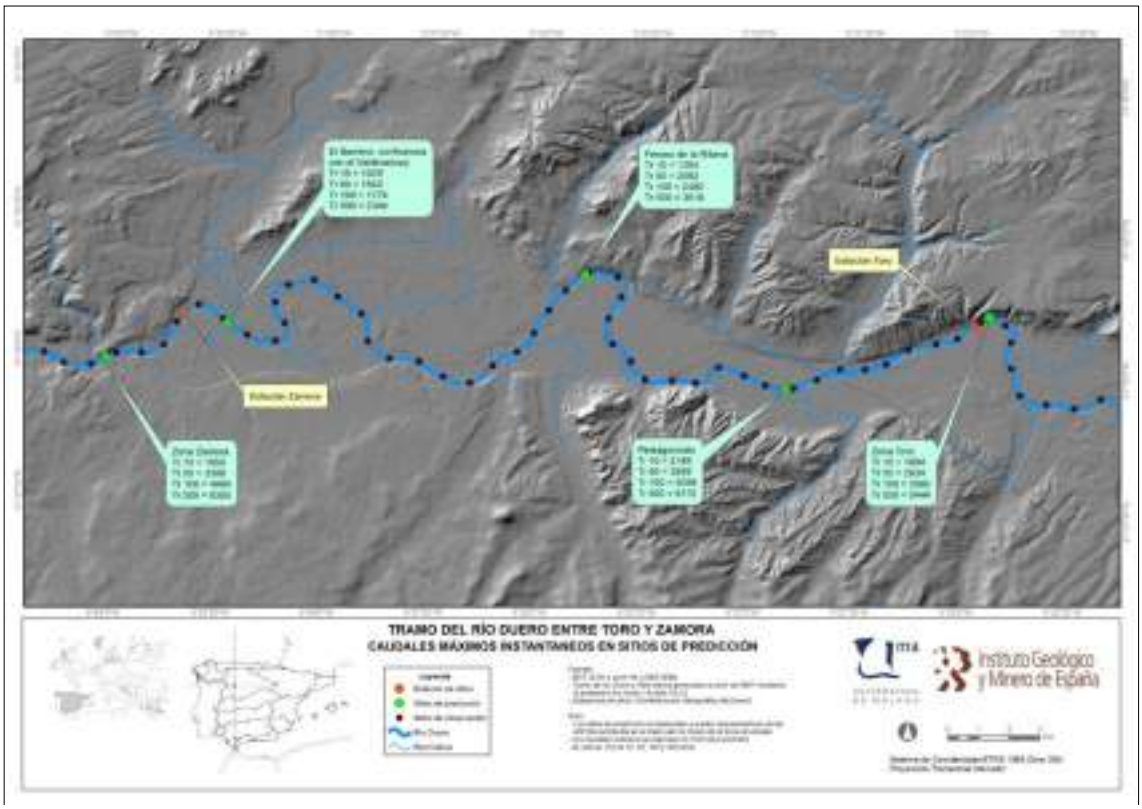


Figura 4. Tramo del río Duero entre Toro y Zamora, caudales máximos instantáneos calculados geoestadísticamente en los sitios de predicción (ver valores en Tabla 6).

Analizando el mapa de la Fig.4 y los valores de la Tabla 6, se puede interpretar que la variabilidad de caudal para cada sitio de predicción se encuentra en función de sus características particulares. Por ejemplo, a la vista de los resultados para periodo de retorno de 10 años, se observa que se parte en la zona de Toro con un caudal estimado de 1694 m^3/s. Al llegar a la localidad de Peleagonzalo se incrementa a 2149 m^3/s, lo cual puede deberse a que el cauce prácticamente presenta una sinuosidad unitaria mostrando un aspecto rectilíneo; y así mismo en este tramo va recibiendo aportes de varios afluentes. Al avanzar hasta la localidad de Fresno de la Ribera, se estima un caudal de 1304 m^3/s, en donde la reducción de caudal se atribuye a que el agua ha discurrido por el tren de meandros, en donde la sinuosidad del cauce se ve incrementada en forma significativa y esto hace que los caudales de crecida se vayan laminando. Igual situación ocurre en el paraje de El Barreno, antes de la confluencia con el río Valderaduey (1028 m^3/s), donde los meandros hacen que la longitud de recorrido del agua sea mayor, se incrementa la sinuosidad y debido a la baja pendiente del río se produce una reducción de la velocidad del agua. Por último, en la zona de Zamora se nota un incremento del caudal 1855 m^3/s, lo cual tiene sentido ya que aguas arriba el río Duero recibe la aportación del río Valderaduey.

4.3. Comparación de resultados obtenidos con valores publicados en el SNCZI

Analizando los resultados obtenidos en el presente estudio se puede visualizar claramente que los caudales estimados estadísticamente (Qc / Qci) para cualquier periodo de retorno y en cualquiera de los dos escenarios, son mayores en la estación del río Duero en Toro que sus equivalentes en Zamora. Estos resultados presentan una discordancia con los valores de CauMax publicados por el SNCZI, y en los que están basados los mapas oficiales de zonas inundables. En cambio, están de acuerdo con las observaciones de los eventos recientes (2018-2020; Tabla 2). En la Tabla 7 se realiza una comparación de resultados de caudales máximos instantáneos (Qci) del escenario 1 (con las series de datos completas) con los valores publicados en el SNCZI.

Periodo de retorno (años)	Estación Toro		Estación Zamora	
	Análisis estadístico	SNCZI	Análisis estadístico	SNCZI
Tr = 10	1472	1975	1230	2112
Tr = 50	2451	---	1945	---
Tr = 100	2947	4310	2291	4737
Tr = 500	4321	6701	3211	7513

Tabla 7. Comparación de valores estimados geoestadísticamente con los publicados en el SNCZI.

Se puede determinar que el análisis estadístico y geoestadístico aplicado en el presente estudio, brinda resultados más congruentes con la realidad observada de la zona, implicando que las áreas inundables presentes en el tramo del río Duero entre Toro y Zamora podrían variar en sucesivas revisiones de próximos ciclos de actualización del SNCZI, para hacerlas más útiles y objetivas en la mitigación del riesgo por avenidas e inundaciones.

5. CONCLUSIONES

- El análisis estadístico de caudales máximos (Qc / Qci) para las estaciones de aforo Toro y Zamora indica que se presentan cuantiles de caudales mayores en la estación de Toro y menores en la de Zamora, notándose la reducción de la punta de crecida como consecuencia de la laminación ejercida por el propio cauce (desbordamiento, ocupación de canales de crecida y brazos ciegos, y la infiltración en el cauce y llanura).
- La metodología de análisis geoestadístico para predicción de caudales máximos en las ARPSI ha permitido calcular nuevos cuantiles de caudales máximos para distintos periodos de retorno, con magnitud y sentido similares a los observados en eventos recientes.
- En futuras revisiones de las cartografías del SNCZI en los siguientes ciclos de actualización, o en la elaboración de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI; Confederación Hidrográfica del Duero, 2016) para las ARPSI existentes en la zona de estudio, se deberían recalcular los cuantiles de los caudales de diseño para reducir las incertidumbres y ajustarlos mejor a la realidad observada en los eventos recientes.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios de caracterización hidrológica de avenidas e inundaciones en el tramo del río Duero entre Toro y Zamora forman parte de la tarea GT1.T1 del proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE). Se agradece a la Confederación Hidrográfica del Duero (ente promotor observador-EPO- del proyecto DRAINAGE), el facilitar el acceso a los datos hidrológicos empleados; y a Luciano Martins (Tragsatec) la colaboración en el tratamiento de la información con el SIG. Este estudio concreto se fundamenta en el trabajo fin de máster del primer autor, codirigido por los otros dos autores mediante el programa de prácticas profesionales en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME); que llevó por título "Análisis hidrológico de la peligrosidad por avenidas e inundaciones en el tramo del río Duero entre Toro y Zamora", presentado en el Máster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente (RHYMA) de la Universidad de Málaga (UMa), durante el curso 2017/2018; por lo que el agradecimiento es extensivo al Dr. Bartolomé Andreo, coordinador del Máster en la UMa.

REFERENCIAS

- CEDEX (2011). *Mapa de Caudales Máximos (CauMax), Memoria Técnica*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- CEDEX (2013). *CHAC. Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas. Manual CHAC*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- Confederación Hidrográfica del Duero (2016). *Plan de Gestión de Riesgos de Inundación (2016). Anejo 1. Caracterización de las ARPSIs*. Valladolid.
- Ver Hoef, J.M., Peterson, E.E. and Theobald, D. (2006). Spatial Statistical Models That Use Flow and Stream Distance. *Environmental and Ecological Statistics*, 13(1), 449-464.
- Ver Hoef, J.M. and Peterson, E. (2010). A Moving Average Approach for Spatial Statistical Models of Stream Networks (with discussion). *Journal of the American Statistical Association*, 105, 6-18.
- Ver Hoef, J.M., Peterson, E.E., Clifford, D. and Shah, R. (2014). SSN: An R package for spatial statistical modeling on stream networks. *Journal of Statistical Software*, 56(3), 1-45.

EFECTOS DE LA DANA DE SEPTIEMBRE DE 2019 SOBRE LA SALINIDAD DE LOS SUELOS Y LAS AGUAS EN LA ZONA DE CARRIZALES (ELCHE-ALICANTE)

José Miguel de Paz
Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible,
Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España
depaz_jos@gva.es
https://orcid.org/0000-0001-6734-3516

Alberto Lamberti
Department of Civil, Chemical, Environmental and Materials Engineering (DICAM) Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Italia
alberto.lamberti@unibo.it
https://orcid.org/0000-0001-6011-2707

Fernando Visconti
Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible,
Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España
visconti_fer@gva.es
https://orcid.org/0000-0003-4393-0972

RESUMEN

La red de drenajes de la Vega Baja del Segura asegura la productividad agraria de la zona gracias a que mantiene los niveles piezométricos por debajo de la zona radicular y a que sirve para lavar los excesos de sales aportados a los suelos por el riego. Para evaluar el funcionamiento de esta red de drenajes en un evento de lluvias intensas e inundación se analizaron los datos procedentes de una red inalámbrica de sensores en una parcela de la comunidad de regantes de Carrizales (Elche-Alicante) obtenidos durante el episodio de la DANA ocurrida en septiembre de 2019. En el presente trabajo se muestra la evaluación de los efectos de este episodio en la humedad del suelo, el nivel piezométrico, los niveles en los canales de drenaje de la zona, así como el nivel de salinidad del suelo y las aguas. Se demuestra que el buen mantenimiento de la red de drenajes se hace imprescindible para evacuar efectivamente hacia el mar el agua excedentaria aportada por las lluvias intensas, como las acaecidas los días 12 y 13 de septiembre de 2019 en toda la zona de la Vega Baja del Segura y el Bajo Vinalopó.

1. INTRODUCCIÓN

La Vega Baja del Segura y el Bajo Vinalopó conforman una zona del Mediterráneo español donde los niveles freáticos altos, la salinidad de los suelos, la reutilización de las aguas, las recurrentes inundaciones y la proximidad del mar han configurado su actividad agrícola durante siglos. La densa red de drenajes que cruza el Bajo Segura permite evacuar de forma eficiente las aguas sobrantes del riego, lixiviar las sales acumuladas en el suelo durante la producción agraria y, además, en épocas de lluvias intensas, avenar toda el área (Melgarejo et al 2013).

En esta zona del sur de la provincia de Alicante es donde se concentran los mayores problemas de

salinidad de la Comunidad Valenciana con más del 98% de la superficie agraria afectada por salinización del suelo (de Paz et al. 2011). Esto conlleva que la práctica totalidad de los cultivos plantados en el área (86%) presenten pérdidas de producción por salinización de, al menos, un 10% (de Paz et al. 2010). El sistema de riego más frecuente en la zona continúa siendo el tradicional a manta, el cual deriva sus aguas del río Segura y las distribuye mediante una red de acequias y evacúa los retornos de riego mediante una red inversamente complementaria de azarbes (Melgarejo et al., 2013). Las aguas de los azarbes son aplicadas de nuevo al riego por las comunidades de regantes que no tienen derecho a usar directamente el agua del Segura, llegándose a reutilizar el agua hasta cinco veces si se incluye la impulsión final hacia el Campo de Elche de tal modo que se logra una gran eficiencia de uso tomando toda el área en su conjunto. Esta reutilización del agua de riego conlleva, no obstante, un incremento de sus niveles de sales de hasta 0.5 dS/m en términos de conductividad eléctrica a 25ºC_(CE_{25}) por cada uso del agua. En consecuencia, la última comunidad de regantes de la Vega Baja, Carrizales, es la que dispone del agua de peor calidad y es, además, donde los problemas de inundación son más graves por encontrarse en la parte de elevación más baja y cercana al mar.

La Vega Baja del Segura y el Bajo Vinalopó presentan un clima mediterráneo semiárido, en el que las precipitaciones intensas y las consiguientes inundaciones son características. Suelen estar causadas por situaciones de depresión aislada en niveles altos (DANA) al sur de la península Ibérica, con vientos sostenidos de componente este que soplan sobre el Mediterráneo adquiriendo una gran humedad y agua precipitable. Debido a la elevada temperatura que el mar presenta a finales del verano y el otoño frente al sureste peninsular, estos episodios de lluvias intensas ocurren preferentemente de agosto a noviembre.

Los días 12 y 13 de septiembre de 2019 se produjo un evento de lluvias intensas en la zona de la Vega Baja del Segura y Bajo Vinalopó por causa de una DANA muy profunda sobre el mar de Alborán (Martín, 2019). Este episodio produjo una inundación que afectó de forma dramática a una gran extensión de campos de cultivo localizados en la zona de la comunidad de regantes de Carrizales. Las lluvias que cayeron en Carrizales entre ambos días alcanzaron un acumulado total de 272 mm según registros propios con un pico de intensidad de 80 mm/h ocurrido el día 12 en torno al mediodía (Fig. 1).

Sin embargo, dado que Carrizales es zona natural de desagüe tanto del Segura como del Vinalopó una avenida debida al desbordamiento del río Segura y otra procedente del Campo de Elche alcanzaron la zona de Carrizales tres días después de los registros intensos de lluvia manteniéndola inundada durante más de una semana.

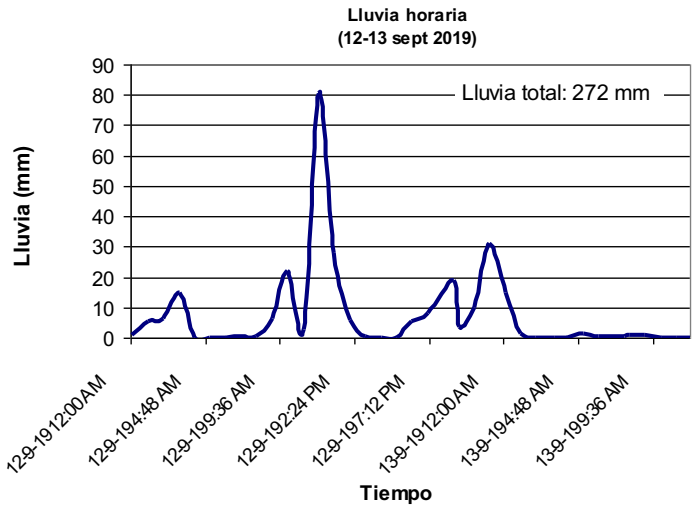


Figura 1. Registro horario de las lluvias caídas entre el 12 y el 13 septiembre de 2019 en la comunidad de regantes de Carrizales.

2. OBJETIVOS

Hasta ahora se desconocía la eficiencia de lavado de los drenajes instalados en la Vega Baja del Segura, así como el efecto que tienen los eventos de inundación en los niveles de humedad y salinidad de los campos de cultivo de la zona. El objetivo principal de este trabajo es disponer de un mejor conocimiento sobre el comportamiento de los suelos y drenajes de la zona de Carrizales frente a un periodo de lluvias intensas e inundación como el causado por la DANA del 12 y 13 septiembre de 2019.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. El proyecto SMART AGROWETLANDS II

El proyecto SMART AGROWETLANDS II - Smart Water and Soil Salinity Management in Agro-wetlands, financiado por la convocatoria europea LIFE, tiene como objetivo contrarrestar la degradación del suelo y la alteración de los ecosistemas naturales de los humedales a través de una gestión específica y eficiente de los recursos hídricos. El proyecto prevé la implementación de un sistema inteligente de gestión del riego en dos agrohumedales mediterráneos el cual, mediante el monitoreo de los variables meteorológicas, así como otras del suelo, el agua subterránea y el agua de riego, proporcionará datos a un modelo que simulará la humedad y salinidad del suelo, y a partir de estas simulaciones formulará recomendaciones de riego para apoyar la toma de decisiones de los agricultores.

Este proyecto, liderado por la Universidad de Bolonia y en el que colabora la empresa de tecnología WiNET y el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) ha establecido una red de sensores en una zona de regadío del delta del río Ravena (Emilia-Romagna, Italia) y en la zona de la comunidad de regantes de Carrizales (Elche-Alicante, España). El establecimiento de estas dos redes inalámbricas ha permitido monitorizar las principales variables referentes a la meteorología, así como la salinidad y el nivel de agua de los canales de riego y drenaje, el manto freático y la humedad y salinidad del suelo a diferentes profundidades en dos agrohumedales alejados pero que comparten una problemática similar.

3.2. La parcela experimental de Carrizales

La zona de la comunidad de regantes de Carrizales donde se encuentra la parcela experimental (Fig. 2) se caracteriza por presentar un nivel freático muy superficial (80 cm en la misma parcela), salinidad del suelo elevada (CE_{es} > 4 dS/m) y aguas de drenaje con salinidad también muy alta (CE_{25} ~ 7 dS/m).



Figura 2. Localización de la parcela demostración en la comunidad de regantes de Carrizales (Elche-Alicante, España)

El campo experimental está cultivado de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y se riega por inundación con unos 720-960 L m^{-2} por año a partir de dosis de 80 L m^{-2} cada 20 días durante la época de mayor demanda del cultivo y cada 30 días durante el invierno. La parcela cuenta con tubos de drenaje que la atraviesan a 90 cm de profundidad, los cuales desaguan en una zanja abierta en uno de los laterales. Este sistema de drenaje asegura que el nivel freático se mantenga por debajo de los 80 cm en condiciones normales de riego, lluvia y evapotranspiración.

El suelo de la parcela tiene una textura arcillo-limosa, con un nivel de materia orgánica alta (> 2%), contenido de carbonato cálcico equivalente (CCE) elevado (> 40%), y una densidad aparente moderada (< 1.4 gcm^{-3}) (Tabla 1). La conductividad eléctrica a 25 ºC del agua de riego es muy variable con una media de 4 dS m^{-1}, y un rango que va de 1 a 8 dS m^{-1} (Fig. 3).

Prof. (cm)	Arc. (%)	Lim. (%)	Are. (%)	Clase textural (USDA)	Materia orgánica (%)	CCE (%)	pH	DA (g/cm^3)
0-10	50.7	42.8	6.5	Limo-arc	3.03	48.3	8.05	1.16
10-30	55.3	40.7	4.0	Limo-arc	2.22	47.5	8.02	1.29
30-60	54.5	41.0	4.5	Limo-arc	1.84	52.8	7.64	1.37
60-90	52.7	42.8	4.5	Limo-arc	1.08	59.5	7.82	--

Tabla 1. Principales características del suelo* del campo de demostración en Carrizales. *Arc.: arcilla, Are.: arena; CCE: carbonato cálcico equivalente; DA: densidad aparente; Lim.: Lim.

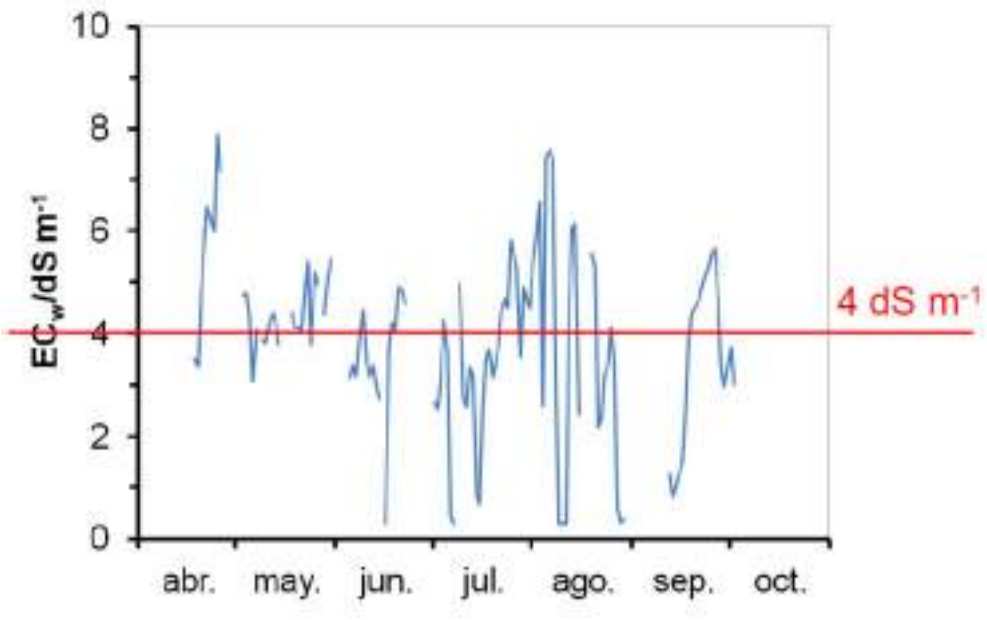


Figura 3. Conductividad eléctrica a 25 ºC del agua de riego de Carrizales.

3.3. La red inalámbrica de sensores

La configuración de la red de sensores inalámbricos instalada en la parcela consta de un nodo de recepción de datos mediante Wi-Fi, registro (*data-logger*) y transmisión vía 4G a un servidor remoto, una estación meteorológica completa (Davis Instruments Corp,. Hayward, California, EE.UU.) y los siguientes sensores (Fig. 4):

- Tres sensores GS3 de METER Group, Inc. (Pullman, Washington, EE.UU.) para medir la CE, la temperatura y la humedad del suelo en 2 puntos de la parcela a 50 cm de profundidad, y otro instalado en otra parcela no cultivada y sin riego.
- Una sonda TriSCAN de Sentek Pry Ltd. (Stepney, South Australia, Australia) con la que se monitorizó la humedad del suelo cada 10 cm hasta una profundidad de 60 cm, y cada 20 cm hasta 80 cm.
- Tres sensores CTD para el control de la temperatura, salinidad y la altura del agua del canal de riego, del canal de drenaje y del piezómetro instalado en la parcela.

A partir de esta configuración se pueden monitorizar las variables más relevantes para evaluar la eficiencia del riego y el lavado de sales. El sistema fue capaz de registrar las lluvias y el resto de variables hidrológicas y de salinidad de la parcela experimental de forma horaria durante los días en los que la DANA de septiembre afectó a la zona. A partir de la información generada por esta red inalámbrica de sensores se han podido seguir los efectos de la inundación que afectó a la parcela en septiembre de 2019.

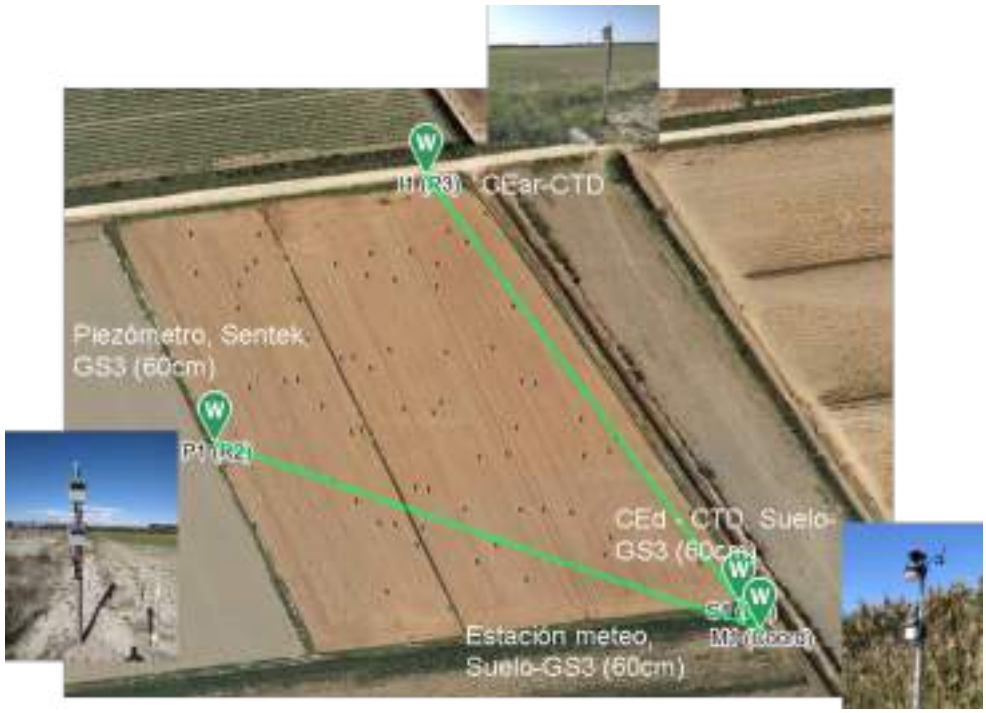


Figura 4. Red inalámbrica de sensores instalados en el campo de demostración de Carrizales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efectos de la DANA en la humedad del suelo

Tal y como se observa en la figura 5, en condiciones normales de riego, lluvia y evapotranspiración la humedad del suelo se mantiene elevada en prácticamente todo el perfil del suelo durante la mayor parte de la primavera y el verano. Por lo tanto, el manejo del riego seguido por el agricultor está siendo adecuado para cultivos con sistemas de enraizamiento profundo como la alfalfa. Esta elevada humedad del suelo asegura la cantidad correcta de agua disponible para la planta en el perfil del suelo hasta una profundidad de 50 cm, además de proporcionar pequeñas pérdidas de agua por drenaje profundo tal y como se puede observar de acuerdo con los pequeños picos de humedad a 80 cm (Fig. 5).

Las pérdidas de agua por drenaje profundo son necesarias para lixiviar el exceso de sales aportadas con el riego, y así mantener el contenido de sales del suelo en la profundidad de enraizamiento dentro de los límites de tolerancia del cultivo. Sin embargo, para cultivos con una profundidad radicular más superficial, como el melón y el brócoli, la dosis de riego debe ser inferior a 80 L m^{-2}, además de aplicarse con mayor frecuencia. En estos últimos casos, se recomienda un sistema de riego más eficiente como el goteo (Visconti el al., 2019, 2020). Aunque la alta salinidad del agua de riego y del suelo aconseja que el sistema de riego por inundación lixivie las sales, el riego por goteo podría instalarse solo para estos cultivos que generalmente están en rotación con otros con sistemas de enraizamiento más profundos e irrigados por inundación como la alfalfa.

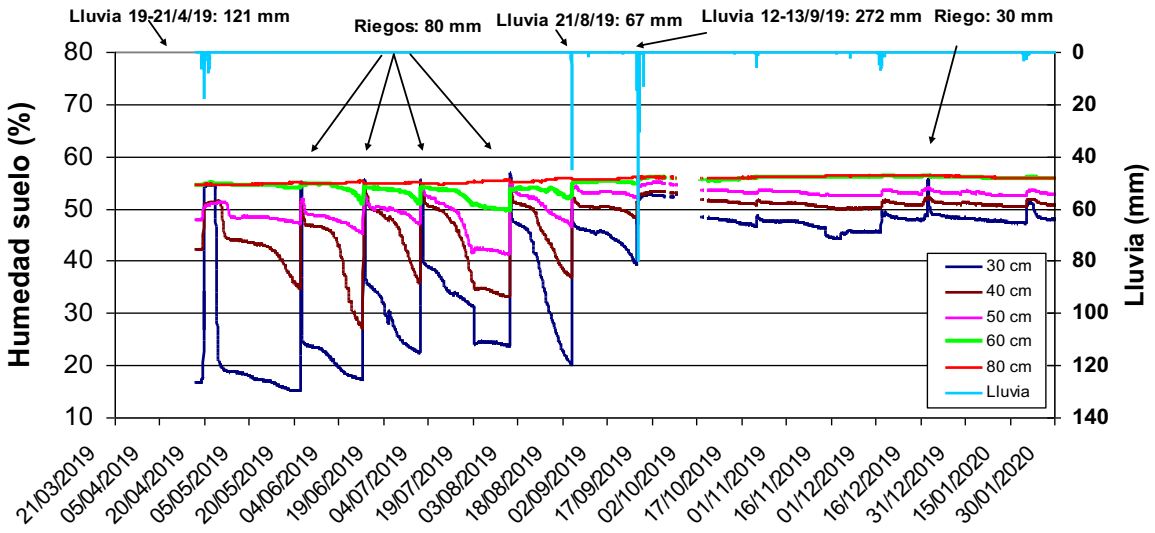


Figura 5. Humedad del suelo a diferentes profundidades de la parcela experimental de alfalfa en carrizales.

Previamente a la DANA, el día 21/8/2019 se produjo en la zona una lluvia de 67 mm que incremento la humedad del perfil del suelo a valores cercanos a la saturación (Fig. 5). Este hecho facilitó que durante el episodio de la DANA ocurrido 22 días después se alcanzase la saturación del suelo rápidamente. La elevada humedad del suelo junto con el nivel freático superficial, que se encontraba a 80 cm de profundidad, facilitó que se alcanzase la saturación de todo el suelo con los primeros 30 mm de lluvia caídos en el inicio de la DANA. La saturación de todo el perfil del suelo (unos 328 mm) provocó la asfixia radicular y la consecuente pérdida del cultivo (Fig. 6). La posterior avenida procedente del desbordamiento del río Segura y la escorrentía del Campo de Elche, junto con la ausencia de transpiración del cultivo, y la gran capacidad de retención del suelo facilitaron que los niveles de humedad se mantuvieran cercanos a la saturación (> 318 mm) durante más de un mes incluso a 30 cm de profundidad.



Figura 6. Estado de la parcela de Carrizales en noviembre de 2019 con toda la alfalfa perdida después de las lluvias e inundación de septiembre

4.2. Efectos de la DANA en la salinidad del suelo

En condiciones normales de cultivo y observando los registros de la conductividad eléctrica en extracto de saturación (CE_{es}) estimados a partir de las lecturas de los sensores GS3 ubicados a 50 cm de profundidad, la salinidad del suelo fue ascendiendo paulatinamente desde los 4 dS m^{-1} en abril hasta los 5 dS m^{-1} y más en agosto (Fig. 7). En cualquier caso, las sales se fueron efectivamente lixiviando del suelo durante estos meses críticos de la temporada de riegos como pone de manifiesto el paulatino ascenso de la CE_{25} del agua del manto freático desde 5 hasta casi 7 dS m^{-1} y el ascenso y descenso del nivel piezométrico siguiendo los riegos (Fig. 9). En las capas superficiales de 0-20 y 20-40 cm la CE_{es} bajó a valores entre 2 y 3.5 dS m^{-1} gracias al efecto de lavado del suelo producido durante la DANA (Fig. 8). Estos valores están cercanos al límite de tolerancia de cultivos como la alfalfa (3.37 dS m^{-1}).

En el campo en el cual no se ha mantenido el cultivo y por lo tanto no se producen lavados de sales por el riego, se observa un nivel más elevado de salinidad según muestran los valores del sensor GS3 localizado cercano a la parcela ensayo. En esta parcela no cultivada los valores de CE_{es} se mantienen muy constantes en torno a los 6 - 7 dS m^{-1} (Fig. 7). Este nivel de salinidad afectaría de forma importante incluso a la mayoría de los cultivos tolerantes existentes en la zona. Según esto, el mantenimiento del riego y de los drenajes en la zona de Carrizales mantendría los niveles de salinidad en valores inferiores en hasta 2 dS/m e incluso más en primavera, por lo que el sistema de riego y drenajes en la zona efectivamente contribuye a mantener la salinidad controlada en valores agronómicamente aceptables.

Durante el inicio de las lluvias de la DANA se produjo un lavado de sales del suelo regado desde horizontes superficiales a más profundos debido a la baja salinidad del aporte de las aguas de lluvia (CE = 1 dSm^{-1} según el registro del sensor de salinidad ubicado en el canal de riego), observándose una reducción de casi 1 dS m^{-1} de la CE_{es} del suelo a 50 cm de profundidad durante los días posteriores a las lluvias intensas (Fig. 7). Posteriormente se produce un aporte de agua debido a la avenida del rio que arrastró las sales de los campos de la zona incrementándose la salinidad hasta una CE = 6 dSm^{-1}, lo cual hizo recuperar rápidamente los niveles de salinidad del suelo que se habían observado desde mediados de agosto hasta la DANA y que eran de 5 dS m^{-1}. En contraste con el suelo regado, en el suelo no regado las lluvias en vez de reducir la salinidad del suelo la incrementaron debido, o bien al lavado de las sales de los horizontes superficiales, o bien al ascenso de sales desde el manto freático salino (Fig. 7). Estas sales fueron posteriormente poco a poco lavadas a las capas más profundas del suelo al retirarse las aguas de inundación, pero manteniéndose siempre en niveles superiores al campo regado en casi 1 dS m^{-1} de CE_{es} durante prácticamente el resto del otoño.

Así, la lluvia de la DANA tuvo un efecto de lavado de sales en el suelo regado y de incremento de sales en el suelo no regado, y en los horizontes superiores. Las lluvias intensas contribuyeron a lixiviar las sales del suelo no regado, pero apenas afectó al suelo regado por lo aportes de sales de la avenida del rio. Con la avenida posterior del rio cargado de sales y por aportes de sales de la capa freática se incrementaron los niveles de salinidad del suelo hasta recuperar sus valores de equilibrio con las aguas subterráneas de la zona.

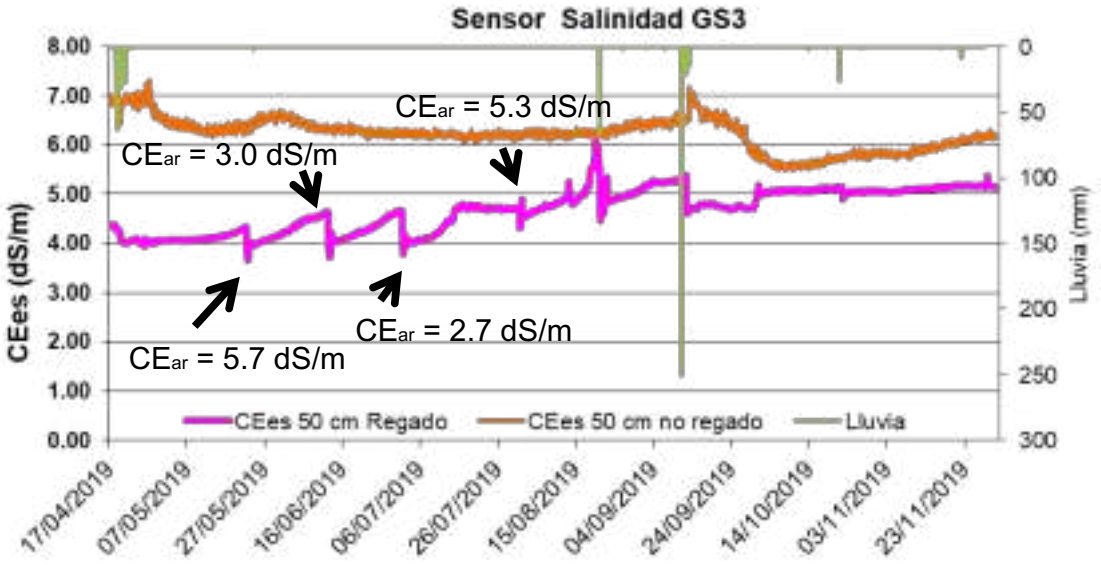


Figura 7. Niveles de salinidad a 50 cm de profundidad del suelo regado y no regado.

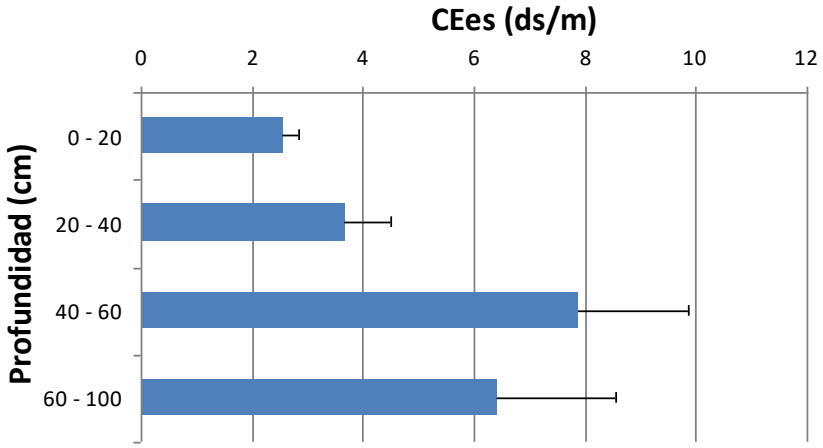


Figura 8. Conductividad eléctrica en el extracto de saturación del perfil del suelo en el campo regado después de la DANA.

4.3. Efectos de la DANA en el nivel freático de la parcela y su salinidad

A partir de las lecturas del sensor CTD instalado en un piezómetro a 1,5 m de profundidad se logró monitorizar la altura piezométrica y la salinidad del agua subterránea del campo (Fig. 9). Según esta monitorización se observó que en condiciones normales las dosis de riego de 80 Lm^{-2} aplicadas por el agricultor no elevan el nivel freático por encima de los 70 cm, y que estas subidas son temporales. Esto indica que el sistema de drenajes de la parcela opera correctamente en condiciones normales de riego, lluvia y evapotranspiración en el cultivo de la alfalfa. Solo en caso de lluvias intensas en la zona los niveles freáticos se elevan alcanzando la zona radicular y afectándola por hipoxia y recarga de sales en las capas superficiales del suelo.

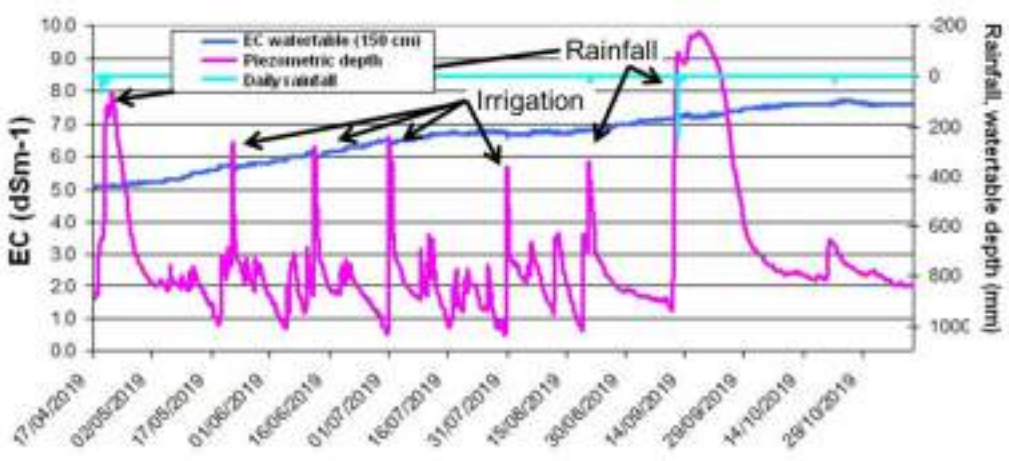


Figura 9. Nivel piezométrico, conductividad eléctrica del agua subterránea y régimen de lluvias durante la campaña de riegos de la alfalfa del año 2019.

Durante el periodo de DANA el nivel piezométrico se elevó hasta la superficie con las primeras lluvias, debido a que el suelo, que se encontraba con una elevada humedad, alcanzó rápidamente la saturación, lo que aceleró la aparición de una lámina de agua a nivel superficial (Fig. 10). Pasada la lluvia intensa del día 12 septiembre (250 mm) y, aunque se produjeron unas lluvias más moderadas (25 mm), se observó un inicio del descenso del nivel freático debido a que los drenajes operaron correctamente y comenzaron a evacuar el exceso de agua. Esta evacuación se frenó debido a la posterior avenida del agua desbordada del río Segura y las escorrentías del Campo de Elche que inundaron la zona e incrementaron el nivel freático de nuevo por encima de la superficie del suelo. Esta avenida superó la capacidad de evacuación del sistema de drenaje de la zona favoreciendo que el suelo se mantuviera con una lámina de agua constante durante 11 días, dando lugar a una situación de asfixia radicular muy prolongada que produjo la pérdida total del cultivo, tardando 30 días en recuperarse los niveles normales en la zona.

Según esto, los drenajes en la misma zona pueden evacuar el agua de las lluvias intensas, pero no son capaces de responder de igual manera frente a un desbordamiento del río como el que ocurrió. Esto señala la importancia de mantener el cauce del río limpio y en buenas condiciones para evitar en lo posible su desbordamiento, así como mantener también en buenas condiciones la red de drenajes para que sean capaces de avenar las aguas hacia el mar de manera directamente evitando en lo posible que desborden a su vez en zonas como la de Carrizales.

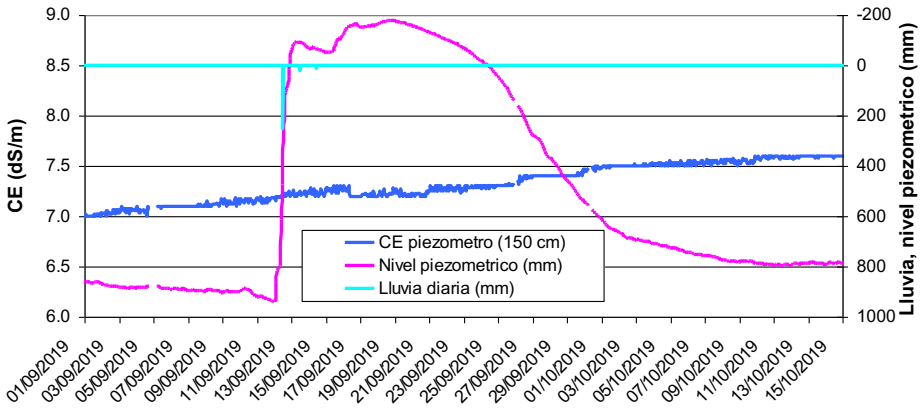


Figura 10. Detalle de la evolución del nivel freático, de su salinidad y el régimen de lluvias en la parcela de Carrizales durante el episodio de la DANA de septiembre de 2019 y las semanas posteriores.

Con respecto a la salinidad del nivel freático, la enorme inercia del contenido en sales de la capa freática a 1,5 metros de profundidad parece ser la causa de que el efecto de lavado de las lluvias de la DANA sobre la parcela no durase. La salinidad del suelo regado y no regado tendieron a igualarse durante el tiempo que duró la inundación rompiéndose dicha tendencia una vez se retiraron las aguas. A la profundidad de 1,5 m solo se ha observado una leve reducción de la salinidad a esa profundidad según los datos recogidos. En última instancia el equilibrio de sales que existe en el campo no fue significativamente alterado durante el episodio de la DANA, debido principalmente a la elevada salinidad del agua freática (5 - 8 dS m^{-1}).

5. CONCLUSIONES

La instalación de una red inalámbrica de monitoreo nos ha permitido conocer el comportamiento de hidrológico y salino de la parcela. Gracias a esta información podemos decir que el mantenimiento del sistema de drenaje de la Vega Baja del Segura y Bajo Vinalopó es crucial para evitar los daños en la agricultura producidos por las inundaciones provocadas por periodos de lluvias intensas, así como la salinización de las tierras de cultivo. Estos drenajes pudieron evitar los daños producidos por la inundación producida por la DANA del 12-13 septiembre de 2019 si no se hubiera producido el desbordamiento del río Segura y la posterior inundación de la zona. La salinidad de la zona no se vio muy afectada debido a la enorme inercia de la salinidad de las aguas freáticas de la zona. Solo en la zona radicular del suelo se produjo un lavado de sales desde horizontes superficiales (< 40 cm) hacia los subterráneos (> 40 cm). Gracias a la red inalámbrica de sensores se pudo determinar que una lámina de agua se mantuvo durante 11 dias a nivel de la superficie lo que provocó la asfixia total de los cultivos de la zona y que los niveles freáticos tardaron 30 días en volver a sus valores normales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Programa LIFE 2014-2020, Proyecto LIFE AGROWETLANDS II - Smart water and soil salinity management in agro-wetlands / Gestión inteligente de la salinidad del agua y el suelo en los humedales agrícolas - LIFE15 ENV/IT/000423 coordinado por Alma Mater Studiorum Università di Bologna.

REFERENCIAS

- De Paz, J. M., Visconti, F. & Rubio, J. L. (2011). Spatial evaluation of soil salinity using the WET sensor in the irrigated area of the Segura river lowland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174, 103-112.
- Martín, F. (2019). Los “secretos” de la catastrófica dana de septiembre de 2019. Parte I. https://www.tiempo.com/ram/los-secretos-de-la-catastrofica-dana-de-septiembre-de-2019-parte-i.html
- Melgarejo, J., Trapote, A. y Roca, J. F. (2013). La infraestructura hidráulica y la gestión del agua en los regadíos tradicionales en la Vega Baja del Segura (Alicante). *Revista Pilquén*, 13, 1-20.
- Visconti, F., Romero, P., Salvador, A., Navarro, P. y de Paz, J. M. (2019). Effects of three irrigation systems on ‘Piel de Sapo’ melon yield and quality under salinity conditions. *Agricultural Water Management*, 226, 105829. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105829
- Visconti, F., Romero, P., Salvador, A., Navarro, P. y de Paz, J. M. (2020). Producción y calidad del melón piel de sapo regado por goteo superficial y subsuperficial en condiciones de salinidad. *Agrícola Vergel: Fruticultura, Horticultura, Floricultura*, 423, 33-39.

PREVENCIÓN FRENTE A PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS EN EL AGUA DE CONSUMO HUMANO DURANTE INUNDACIONES

Arturo Albaladejo Ruiz
Colaborador honorífico del IUACA, Universidad de Alicante, España
Director Técnico Acciona Agua Servicios, S.L.U.
arturo.albaladejo.ruiz@acciona.com

María Yolanda Pérez Bragado
Responsable Calidad del Agua Acciona Agua Servicios, S.L.U
mariayolanda.perez.bragado@acciona.com

RESUMEN

Se plantean los procedimientos actuales de actuación frente a incumplimientos del RD140/2003 por trihalometanos (THM), y el desarrollo de un sistema de prevención a dichos eventos mediante el seguimiento online de parámetros básicos de calidad y la aplicación de modelos de predicción mediante sistemas de inteligencia artificial.

1. ANTECEDENTES

Es bien sabido que, en épocas de fuertes lluvias e inundaciones, en el agua potable de las redes de distribución pueden aparecer trihalometanos (THM), que son unos subproductos de la desinfección formados cuando aparece un exceso de materia orgánica en el agua de captación (sustancias orgánicas naturales, ácidos húmicos y fúlvicos, y productos metabólicos de algas y células muertas) y se emplea el cloro como desinfectante del agua de consumo humano. Los THM más comunes en el agua potable son cuatro, que se presenta en cómo los siguientes compuestos:

- Cloroformo.
- Bromoformo.
- Bromodiclorometano (BDCM).
- Dibromoclorometano DBCM).

La mayoría de los estudios epidemiológicos relacionan determinadas exposiciones a THM de subproductos de desinfección con cloro, con ciertos efectos sobre la salud como el cáncer de vejiga y determinados defectos de nacimiento en recién nacidos de madres expuestas.

El RD 140/2003 y otras normativas europeas establecen el máximo de concentración permitida de THM totales (suma de cloroformo, bromodicloroometano, dibromoclorometano y bromoformo) en 100µg/l, fijando unos márgenes de seguridad para garantizar un alto grado de protección a la población.

La nueva Directiva Europea de Aguas de Consumo, que se publicará durante 2020, mantiene el mismo límite para los trihalometanos. Este valor ha sido reconfirmado en base a las recomendaciones de los expertos de la OMS que han sido consultados durante el proceso. Por tanto, el actual límite es considerado plenamente vigente para garantizar la seguridad sanitaria del agua.

2. FORMACIÓN DE THM EN EL AGUA DE CONSUMO HUMANO

Podemos establecer que existen cuatro definiciones de los THM:

- THM instantáneos, que es la concentración en el momento del muestreo
- THM final, que es la concentración final, el valor que nos aparece en el boletín de análisis
- Formación potencial de THM, que es la diferencia entre la concentración final y la inicial de THM
- Potencia máxima total de THM, que es el valor máximo que se podría obtener de THM en las condiciones más favorables de formación.

Los factores que influyen en la formación y concentración de los THM en el agua de consumo humano son los siguientes:

- La materia orgánica en el agua bruta: ya que estas sustancias son las precursoras de los THM al reaccionar con el cloro (oxidante fuerte) utilizado para la desinfección del agua de consumo.
- El origen del agua bruta:
    - Las aguas de origen subterráneo, al tener menor carga de materia orgánica requieren menor dosis de desinfectante y dan lugar a concentraciones menores de THM, normalmente del orden de los 10 µg/l
    - Las aguas superficiales, al verse afectadas por fenómenos climatológicos (fuertes lluvias, altas temperaturas...) que provocan un aumento sustancial de los precursores orgánicos pueden llegar a alcanzar valores superiores a 200 µg/l
- La concentración de cloro: la concentración de cloroformo aumenta de forma directa cuanto mayor es la concentración residual de cloro libre.
- La concentración de bromo: El bromo está presente de forma natural en el agua y puede reaccionar con el cloro para formar ácido hipo bromoso y a su vez con los precursores orgánicos.
- La temperatura: manteniendo el pH y la concentración de desinfectante fijos, al aumentar la temperatura mayor es la posibilidad de formación de THM.
- pH: la formación de THM es mayor al aumentar el valor del pH del agua, por la acción catalítica del cloroformo a esos valores de pH.
- Tiempo de residencia del agua en la tubería: Cuanto mayor es el tiempo de contacto entre la materia orgánica y el desinfectante mayor será la concentración de THM formados. Este factor es de suma importancia en la formación de THM como puede apreciarse en el siguiente gráfico que muestra la formación de THM en función del tiempo de contacto y de la concentración de desinfectante.

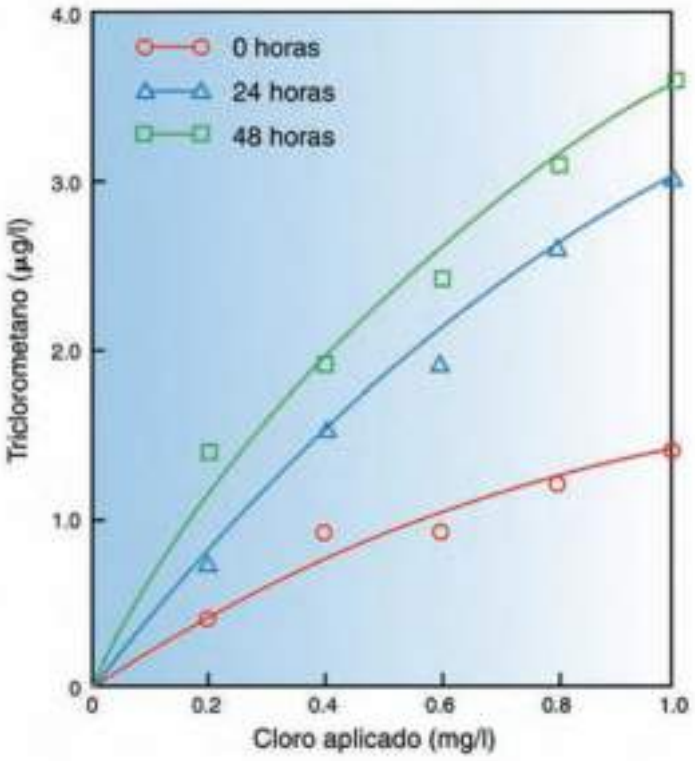


Figura 23. Formación THM según tiempo de contacto y concentración desinfectante.

Esto nos permite afirmar que los trihalometanos no se forman exclusivamente durante la fase del tratamiento de potabilización, sino que al depender de la concentración de precursores y de la dosis de cloro libre residual, esta reacción puede continuar desarrollándose en el sistema de distribución del agua potable. Además, como consecuencia de estos factores, se puede deducir también que la concentración de THM en el agua de consumo dependerá de la zona geográfica y de los cambios estacionales y climatológicos.

En España el cloro es el sistema para desinfección del agua más utilizado para reducir drásticamente las enfermedades bacterianas, virales y parasitarias. Normalmente hay que añadir dosis superiores en las plantas potabilizadoras con el fin de garantizar que el agua potable distribuida contenga una cantidad suficiente de cloro libre residual como protección adicional. Por este motivo, el THM más abundante es el cloroformo y es el principal subproducto del proceso de desinfección que se puede encontrar en el agua clorada.

3. AFECCIONES DE LOS THM EN LOS HUMANOS

Los THM se pueden incorporar al cuerpo humano por diversas rutas, como ingestión de agua, inhalación de los vapores de THM o absorción dérmica por contacto con la piel. Por tanto, además de la ingesta de agua, también puede contribuir a la exposición total a THM otras actividades como la ducha o el baño en la piscina.

Los estudios clínicos sobre el cáncer de vejiga han encontrado un incremento del riesgo debido a largas exposiciones a los THM, aunque los resultados no siempre son significativos. La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer cataloga el bromodiclorometano y el cloroformo como posibles carcinógenos para ciertas condiciones de exposición en humanos ya que a pesar de que existen indicios de su carcinogeidad en animales, no se tienen certezas experimentales en humanos

y, por tanto, el bromoformo y el dibromoclorometano no se han clasificado como cancerígenos ciertos.

La OMS establece unos VG (Valores Guía) recomendados o concentraciones máximas individuales de cada uno de los THM en el agua de consumo humano que no implican ningún riesgo significativo para la salud humana a través de la absorción por consumo prolongado durante toda la vida.

- Cloroformo: 300 µg (microgramos)/l
- Bromodiclorometano (BDCM): 60 µg/l
- Dibromoclorometano (DBCM): 100 µg/l
- Bromoformo: 100 µg/l

Según establece la OMS, para considerar la toxicidad conjunta de los cuatro THM se debe cumplir este requisito:

$$\frac{C_{cloroformo}}{VG_{cloroformo}} + \frac{C_{BDCM}}{VG_{BDCM}} + \frac{C_{DBCM}}{VG_{DBCM}} + \frac{C_{bromoform}}{VG_{bromoformo}} < 1$$

(siendo C la concentración y VG el valor guía)

De conformidad con la legislación vigente (RD 140/2003) sobre calidad del agua de consumo humano, el gestor del suministro de agua de consumo humano debe desplegar un programa de autocontrol anual, realizando análisis periódicos, que incluyen los THM. Los servicios de salud pública también desarrollan un programa propio de vigilancia del agua de consumo. Este control duplicado permite detectar cualquier posible superación de los límites, para generar acciones correctivas y preventivas.

La reducción de los niveles de THM no es fácil puesto que no se puede comprometer la seguridad microbiológica del agua y es por ello por lo que se debe realizar una planificación de la prevención frente a presencia de trihalometanos en el agua potable, sobre todo en caso de inundaciones.

4. ACTUACIONES EN CASO DE PRESENCIA DE THM

4.1. Actuaciones generales frente a incumplimientos RD140/2003

Un incumplimiento es toda superación puntual en una muestra de agua de los valores paramétricos establecidos en el Anexo I del Real Decreto 140/2003, para parámetros microbiológicos, químicos, Indicadores y radiactividad, o en su caso, de los valores paramétricos excepcionados por la Consejería de Salud, así como la presencia en ella de parásitos o sustancias que afecten su condición de salubridad. Como ya se ha mencionado, el RD 140/2003 establece un máximo de concentración permitida de THM totales (suma de cloroformo, bromodicloroometano, dibromoclorometano y bromoformo) de 100µg/l.

Seguidamente se desarrollan las tareas a realizar cuando se produce un incumplimiento del RD140/2003, ya sea por THM o por otro parámetro:

1. Confirmación del incumplimiento: Una vez detectado un incumplimiento en la calidad de agua de consumo, se deberá actuar de la siguiente forma:
   - El gestor confirmará el incumplimiento sobre otra muestra recogida en el mismo punto (y en otros si se considera oportuno) en las 24 horas siguientes a la detección.
   - Confirmado el incumplimiento, el Jefe de Servicio notificará a la Delegación Provincial de la Consejería de Salud, mediante la remisión del modelo recogido en el impreso 6 (anexo

VII del R.D. 140/2003) en las 24 horas siguientes si se trata de parámetros microbiológicos, químicos o radiactividad, y semanalmente en el caso de Parámetros indicadores.
- En cualquiera de los casos, el gestor debe proceder a la introducción del boletín analítico de la muestra que originó el Incumplimiento y la de confirmación en el SINAC, así como el motivo del incumplimiento, y las medidas correctoras y preventivas previstas

2. Valoración del riesgo: El análisis para la evaluación del riesgo sanitario, se realizará considerando los siguientes factores:
   - Causas que han motivado el incumplimiento.
   - Tipo/s de parámetro/s afectados (microbiológico, químico, indicador, de radiactividad).
   - Valor paramétrico alcanzado en el incumplimiento.
   - Resultados analíticos del parámetro en los últimos 12 meses.
   - Población abastecida.
   - Medidas correctoras adoptadas y/o previstas.
   - Evolución y tendencia de la situación.
   - Características de la zona de abastecimiento.
   - Información adicional que conste a la administración sanitaria
3. Gestión del riesgo: Tras la evaluación del riesgo, la Delegación Provincial de la Consejería de Salud dictará las medidas correctoras y de protección de la salud que deban ser adoptadas y, en su caso, el Delegado Provincial de la Consejería de Salud emitirá Resolución de declaración del agua como:
   - No apta para el consumo o No apta para el consumo con riesgo para la salud, cuando el incumplimiento esté originado por parámetros microbiológicos, químicos o de radiactividad o ante la presencia de algún tipo de parásito o sustancia que ocasione la perdida de salubridad del agua distribuida.
   - No apta para el consumo, con no conformidad en cuando el incumplimiento esté originado por parámetros indicadores.

   El incumplimiento de parámetros indicadores no conduce necesariamente a la declaración del agua como No apta para el consumo, si tras la evaluación del riesgo se determina que no conlleva repercusiones sobre la salud de la población abastecida. No obstante, se adoptarán las medidas correctoras necesarias para restablecer el valor del parámetro indicador, y en su caso, se facilitará a la población la información necesaria
4. Cierre del incumplimiento: Desaparecida la causa que originó el incumplimiento, restablecido el valor del parámetro que lo motivó, y notificados los resultados analíticos a través del SINAC, y en aquellas situaciones de incumplimiento que motivaron la declaración del agua de consumo como no apta, el Jefe de Servicio emitirá el Formulario cierre incumplimientos alertas al Delegado Provincial de la Consejería de Salud par que este emita la Resolución de declaración del agua como Apta para el consumo.

   Finalizado el incumplimiento se restablecerá la frecuencia del control analítico, salvo que en base al parámetro que motivó el incumplimiento y su evolución en el tiempo, se establezca una nueva frecuencia analítica durante el periodo que se determine por la Delegación Provincial de la Consejería de Salud.

4.2. Actuación frente a alertas sanitarias

Una alerta es un incumplimiento grave y confirmado o un accidente que suponga un riesgo inminente para la salud de la población. A efectos de declaración de situación de alerta sanitaria se considerarán exclusivamente los siguientes supuestos:

- Aparición de un Brote hídrico en el cual 2 o más personas manifiestan síntomas de enfermedad asociada al agua ya sea por ingesta o contacto dérmico y donde las pruebas epidemiológicas y resultados microbiológicos señalen el agua como origen de la enfermedad.
- Accidente con riesgo inminente para la salud o superación grave y confirmada de los niveles

establecidos para parámetros biológicos, químicos o de radiactividad en un abastecimiento, en el que valorado el riesgo y determinada la gravedad de este se inicie una situación de alerta conforme a los criterios de alerta establecidos en el R.D. 140/2003. En ambos supuestos el gestor comunicará de forma inmediata a la Delegación Provincial de Salud la situación, independientemente de la notificación a través de SINAC del incumplimiento.

Para detectar si estamos ante una alerta sanitaria lo primero que deberemos hacer es aplicar los siguientes criterios:

- El incumplimiento de un parámetro indicador, directamente, nunca dará lugar a la declaración de una alerta sanitaria.
- No todas las declaraciones de agua "No apta" con riesgo para la salud, conllevan el inicio de una alerta sanitaria.
- Todas las alertas sanitarias exigirán la declaración del agua como No apta para el Consumo con riesgo para la salud.

Ante un incumplimiento grave y confirmado o ante un accidente que suponga un riesgo inminente para la salud de la población, la Delegación Provincial de la Consejería de Salud valorará el inicio o no de una situación de alerta realizando la evaluación del riesgo. Las medidas que deberemos adoptar siempre ante una situación de alerta sanitaria son las siguientes:

- Comunicar al Ayuntamientos y resto de gestores implicados, en caso de accidente grave o incumplimiento grave y confirmado.
- Comunicar a la dirección de prevención de la gestora la situación de alerta y de las medidas correctoras establecidas.
- Ejecución de las medidas correctoras establecidas en coordinación con la Delegación Provincial de la Consejería de Salud.
- Información a la población de forma inmediata a la declaración de la alerta.
- Ejecución de la vigilancia analítica adicional establecida por la Delegación Provincial de la Consejería de Salud en tanto en cuanto no se recupere la situación de normalidad o durante el tiempo señalado por esta.
- Establecimiento de suministro alternativo de agua apta para el consumo.

Una vez adoptadas por el gestor las medidas correctoras, subsanada la causa que originó la situación de alerta y comprobada por aquel la vuelta de la concentración del parámetro a los niveles establecidos en la normativa en al menos tres muestras consecutivas tomadas con la periodicidad que fue establecida por la Delegación Provincial de la Consejería de Salud, ésta procederá a cerrar la situación de alerta sanitaria.

Posteriormente la Delegación Provincial de la Consejería de Salud emitirá resolución del Delegado Provincial declarando el agua apta para el consumo, en su caso, informando, en coordinación con el gestor, a los Ayuntamientos y al resto de gestores implicados del cierre de la alerta. Igualmente, el gestor informará a la población de la vuelta a la situación de normalidad.

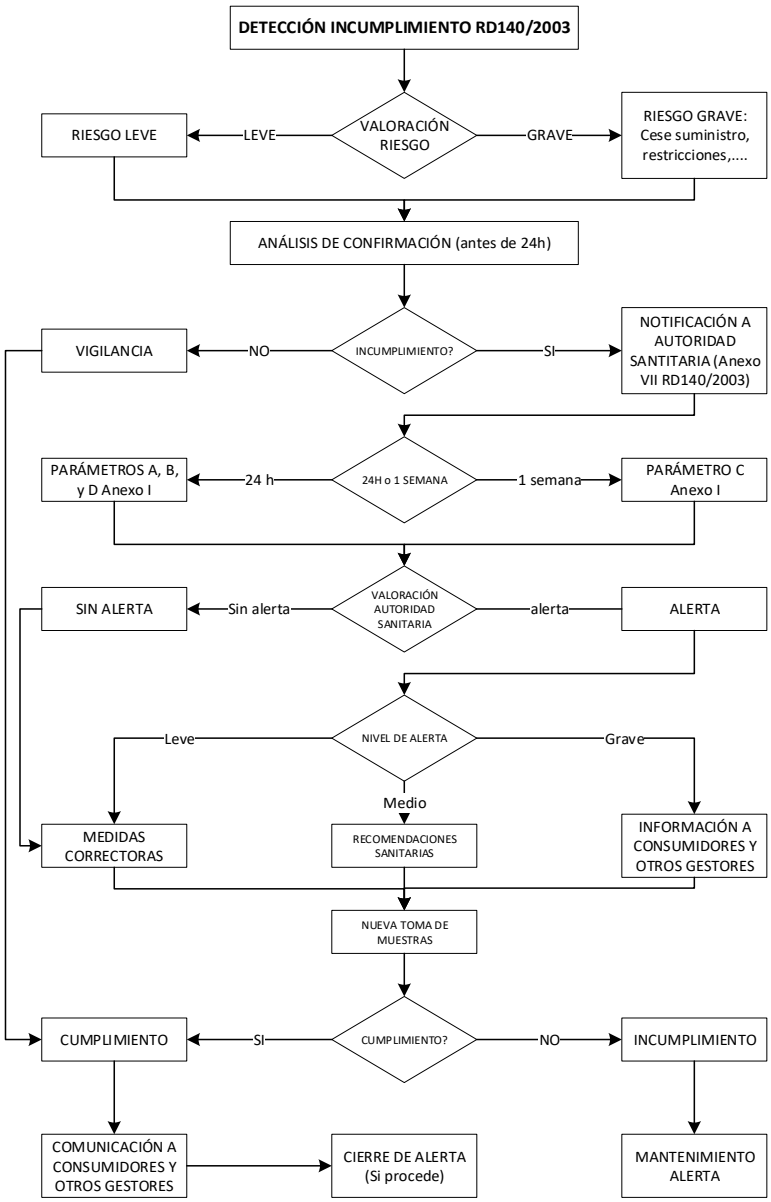


Figura 24. Procedimiento actuación incumplimiento RD140/2003.

Finalizada la situación de alerta se restablecerá la frecuencia de control analítico, salvo que en base al parámetro que motivó el incumplimiento y su evolución en el tiempo, se establezca una nueva frecuencia analítica durante el periodo que se determine por la Delegación Provincial de la Consejería de Salud. Así mismo se informará a la dirección de la finalización de la situación de alerta.

4.3. Actuaciones particulares en caso de incumplimiento por THM

Seguidamente se desarrolla el procedimiento de actuación concreto frente a incumplimientos y alertas sanitarias causados por el aumento de la concentración de THM en el agua de consumo suministrada

1. Valoración del riesgo: el análisis para la evaluación del riesgo sanitario generado por las condiciones meteorológicas adversas y la posibilidad de aumento de la concentración de THM, se realizará considerando los siguientes factores:
   - Causas que han motivado el incumplimiento.
   - Resultados analíticos del parámetro en los últimos 12 meses.
   - Población abastecida.
   - Medidas correctoras adoptadas y/o previstas.

- Evolución y tendencia de la situación.
- Características de la zona de abastecimiento.

2. Gestión del riesgo: tras la valoración del riesgo podemos enfrentarnos a diferentes situaciones, dependiendo de los resultados analíticos obtenidos en la concentración de THM. Los THM deberán medirse tanto en el punto de entrega como en la red de distribución:
3. Solicitar los datos analíticos en el punto de entrega:
   - Si el valor está por debajo de 70 µg/l seguir con la vigilancia y control de THM mientras dure la alerta meteorológica.
   - Si el valor está por encima de 70 µg/l realizar rápidamente un análisis de THM en la red de distribución.
4. Tomar una muestra en el punto más desfavorable de la red de distribución.
   - Si el valor está por encima de 100 µg/l, realizar muestra de confirmación y aplicar actuaciones frente a incumplimientos y alertas sanitarias.
   - Si el valor está por debajo de 100 µg/l, deberemos seguir controlando los THM mientras dure la alerta meteorológica.
5. Controlar en el punto de entrega todos aquellos parámetros relacionados con la concentración de THM: pH, temperatura, turbidez, TOC, y cloro libre residual.
   - Si tuviéramos depósito de distribución con tratamiento de desinfección, entonces ajustar la concentración de cloro en valores no superiores a 0,5 ppm.
   - Si no tenemos depósito, controlar dichos parámetros en Punto de entrega del agua.

PREVENCIÓN DE THM EN EL AGUA DE CONSUMO HUMANO

Todo lo mencionado anteriormente incide en las actuaciones en caso de detección de problemas por presencia de THM, pero no en la prevención de que se produzcan dichos eventos de aparición de THM en el agua de consumo humano.

En la actualidad hay sistemas para la reducción de THM en el agua, como:

1. Los basados en la desorción de los THM mediante la aireación del agua por:
   - Parrillas de difusores en los depósitos de agua en los que se inyecta el aire desde unos soplantes.
   - Rociadores donde se pulveriza el agua recirculada del propio depósito en la que se inyecta aire e incluso removiendo el agua en los depósitos mediante agitadores.
2. También se pueden reducir los THM en el agua cambiando los sistemas de desinfección, sustituyendo los sistemas con cloro (gas o hipoclorito) por sistemas de dióxido de cloro, o incluso utilizar otros desinfectantes.
3. Instalar recloradores en la red de distribución para permitir reducir los niveles de cloro en las plantas de tratamiento y en los puntos de entrada a la red.
4. Otro sistema para reducir la presencia de THM en el agua es variar el mix del agua suministrada a la población (superficial – subterránea – desalada) cuando se sepa que hay una fuerte presencia de materia orgánica.

Pero todos estos sistemas son caros de instalar y mucho más caros de operar y mantener, por lo que es necesario optimizar su uso y para ello es necesario hacer una detección precoz de los eventos de aparición de THM en el agua de consumo humano. Para ello, hace algunos años se desarrollaron modelos matemáticos tradicionales, que hacían predicciones de los eventos en función de parámetros de calidad del agua fáciles de conseguir en tiempo real, como pH, temperatura, Cloro, Potencial Redox y Carbono Orgánico Total. El coste de una estación remota para conseguir datos online de estos parámetros es de alrededor de unos 25.000 € de ejecución material.

Con los avances recientes de los sistemas Big Data y su tratamiento por IA (Inteligencia Artificial), en la actualidad se están desarrollando modelos predictivos basados en Machine Learning, que correlacionando los valores reales de THM en los análisis de laboratorio con esos parámetros online de calidad y los datos meteorológicos, obtienen con altísima precisión las predicciones de los eventos de aparición de THM en el agua de consumo humano, permitiendo activar los sistemas de reducción de THM antes expuestos sólo cuando van a ser necesarios, y facilitando la anticipación en las tareas de avisos y prevención a la población en caso de necesidad.

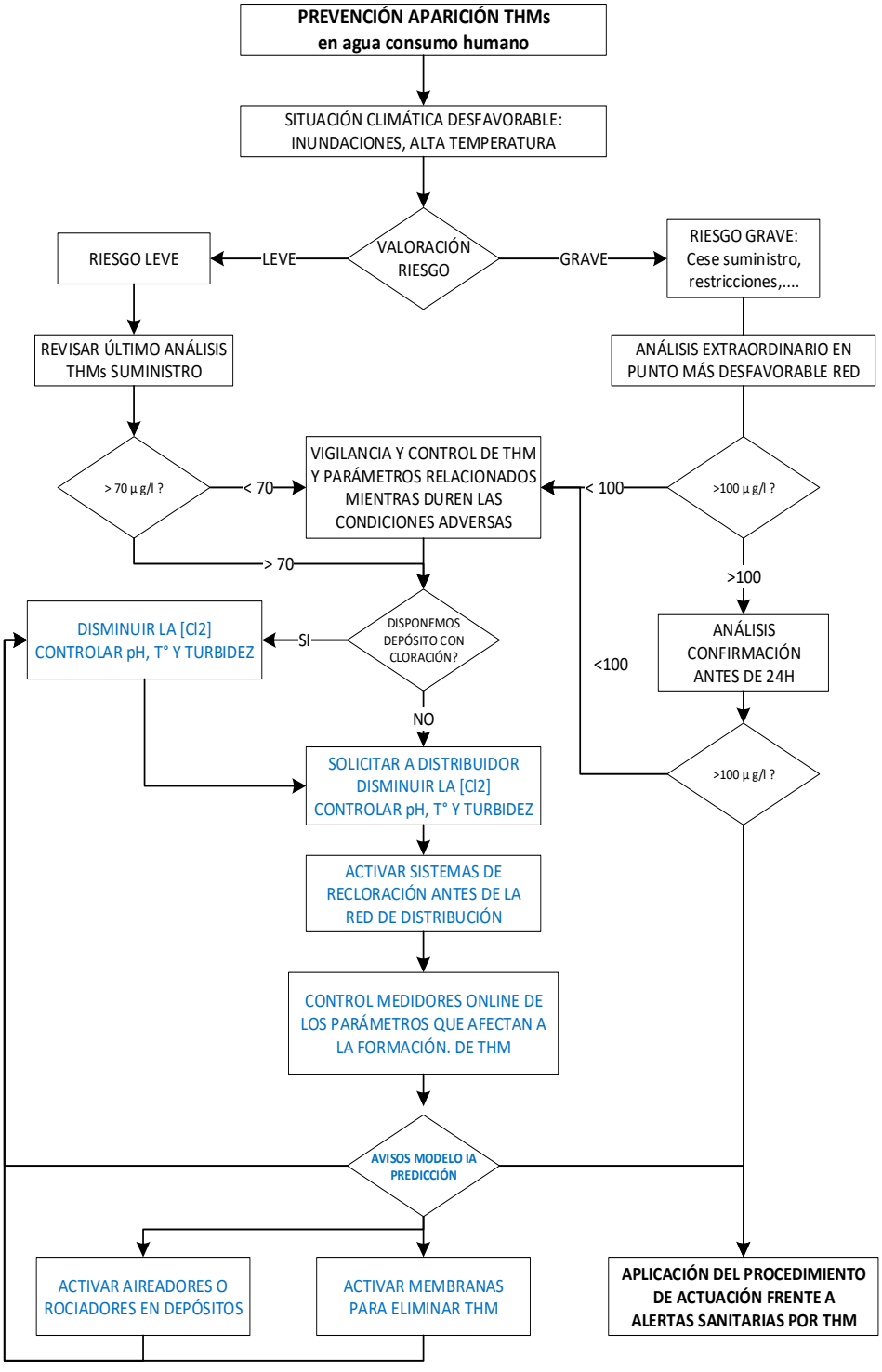


Figura 25. Procedimiento prevención THM.

REFERENCIAS

- Ariño Tarragó R., Minoves Ruiz, M., Paraira Faus, M. (2013) Prueba piloto de una tecnología de eliminación de trihalometanos en un depósito de agua potable. *Revista Tecnoaqua*, Sep-Oct 2013, 74-81.
- https://www.tecnoaqua.es/articulos/20160605/articulo-tecnico-piloto-tecnologia-eliminacion-trihalometanos-thm-deposito-agua-potable-tecnoaqua#.Wa1j6U0UnIU
- Serveis de Vigilància Ambiental Qualitat i Intervenció Ambiental. *Los trihalometanos (THM) en el agua de consumo. Documento informativo*.
- https://higieneambiental.com/sites/default/files/images/pdf/THM_esp.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). *Guías para la calidad del agua potable*. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf
- Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC). http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php
- Agència de Salut Pública de Barcelona. *Informes anuales sobre el estado de salud de la ciudad*. http://www.aspb.cat/quefem/documents_informes_salut_barcelona.htm

ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU IMPACTO EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL EMBALSE DE GUADALEST

Teresa Palacios Cabrera
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Universidad Central de Ecuador, Ecuador
tapalacios@uce.edu.ec

Javier Valdes Abellan
Departamento de Ingeniera Civil, Universidad de Alicante, España
javier.valdes@ua.es

Antonio Jódar Abellán
Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, España
antonio.jodar@ua.es

Rafael Alulema
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Universidad Central de Ecuador, Ecuador
raalulema@uce.edu.ec

RESUMEN

El estudio analiza los cambios en la lluvia-escorrentía producto de los cambios en la cubierta terrestre entre 1990-2018 en la cuenca del Embalse de Guadalest con una superficie de 122,5 km^2, utilizando el modelo del Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS) y detección remota a escala diaria para capturar la dinámica hidrológica compleja: técnicas de SIG (sistema de información geográfica). El propósito es analizar la evolución espacio temporal de la respuesta hidrológica en 12 subcuencas y la dinámica de los cambios en el uso de la tierra /cobertura de la tierra para los años 1990, 2000, 2006, 2012 y 2018. Los hallazgos revelan un cambio de tipo de vegetación esclerófila en un porcentaje de 81,56 % en el esenario inicial 1990, a pastizales naturales con un porcentaje de 81,55 % en el esenario 2018, una disminución de las áreas agrícolas y conversión a bosques de coníferas, pastizales naturales en un porcentaje de 60 % aproximadamente en el mismo período; estos cambios influyen en una disminución de la evapotranspiración (ET) e infiltración en general, con un aumento de la escorrentía en principio pero conforme transcurre el tiempo disminuye trayendo como consecuencia un deficit en la oferta de agua. Los resultados de detección de cambios del suelo entre los años 1990–2018 fueron corroborados con los valores de los números de curva obtenidos. El análisis cíclico y de tendencia de las series históricas de precipitación permite evidenciar una ciclicidad de cinco años y una tendencia decreciente desde 1984 hasta el 2018. Estos hallazgos proporcionan a los responsables de la planificación urbana información muy útil frente a los efectos de las inundaciones repentinas, que han costado incluso vidas humanas en las cuencas de barrancos estudiadas en los últimos años.

1. INTRODUCCIÓN

Las modificaciones humanas, como el cambio de la cobertura del suelo, el riego, urbanizaciones, etc.,

producen cambios en la respuesta hidrológica, en los últimos años, la aplicación de técnicas de teledetección ha contribuido en el mapeo de los cambios de los usos del suelo. Petchprayoon et al. (2010), enfatizó el impacto del uso de la tierra / cobertura de la tierra en el alivio del problema de la inundación, ya que la variación de este factor puede dar lugar a modificaciones significativas en la respuesta hidrológica de las cuencas afectadas (Jodar-Abellan et al., 2019).

Las intensidades de lluvia y los cambios en el uso del suelo están relacionados debido, a que las áreas urbanas modifican el clima regional a través de varias alteraciones en el efecto albedo, emisiones de efecto invernadero, entre otros, variando los equilibrios de agua y la energía superficial. Al final del verano, la temperatura de la superficie del agua cálida del mar Mediterráneo aumenta la energía convectiva de las masas de aire superpuestas y la compleja topografía de estas áreas costeras aumenta la convección húmeda (Amengual et al., 2015; Ballesteros et al., 2018), lo que lleva a eventos de lluvia de muy alta intensidad. Las consecuencias de esta situación se identificaron ampliamente en muchos estudios en las provincias más afectadas del sudeste de España como Almería (Molina-Sanchis et al., 2016), Murcia (Conesa García, 1985; Amengual et al., 2015; Hooke, 2016), Murcia y Alicante (Pérez-Morales et al., 2015).

A lo largo de la costa mediterránea española, se extiende el riesgo de inundaciones repentinas derivadas de una multitud de factores como es un régimen de precipitaciones con presencia de eventos de corta y muy alta intensidad, una orografía relativamente montañosa y con presencia de cuencas de escaso tamaño lo que favorece la aparición de procesos de generación y acumulación de escorrentía muy rápidos. Adicionalmente, en las últimas décadas algunos autores han detectado un cambio en los usos del suelo que está aumentando, provocando un alto riesgo de inundación a través de un aumento de los caudales pico y un descenso en el tiempo de respuesta de estas cuencas (Jodar-Abellan et al., 2019; Jeong, 2016; Pérez-González, 2002).

En el presente estudio para complementar el análisis, se utilizó la herramienta HEC-HMS versión 4.4, es un modelo hidrológico que estudia a escala de cuenca con pasos de tiempo subdiarios, necesarios para simular correctamente la respuesta hidrológica de las cuencas de concentración a corto plazo (Boithias, 2017; Jeong, 2016; López-Chicano et al., 2002). El modelo HEC-HMS ("Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System") fue diseñado para simular procesos de lluvia-escurrimiento en sistemas dendríticos de cuencas, es por ello que se utilizó en el presente estudio. Este modelo se ha aplicado ampliamente en cuencas no calibradas obteniendo, en general, buenos resultados (Boongaling, 2018; Gassman, 2007). La literatura científica informa de modelos robustos no calibrados con resultados apropiados en cuencas no calibradas. Incluso, en regiones semiáridas, algunas experiencias mostraron modelos no calibrados y calibrados con resultados similares (Beven, 2012; Belnap et al., 2001; Zheng et al., 2008; López-Chicano et al., 2002).

2. ÁREA DE ESTUDIO

El embalse de Guadalest se encuentra dentro de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), con una capacidad de 13 hm^3 y una lámina de agua de 64 ha, la subcuenca vertiente al embalse tiene una superficie de 122,5 km^2 y nace en de la confluencia de los barrancos de Fabara y Beniardá al pie de la Sierra del Serella.

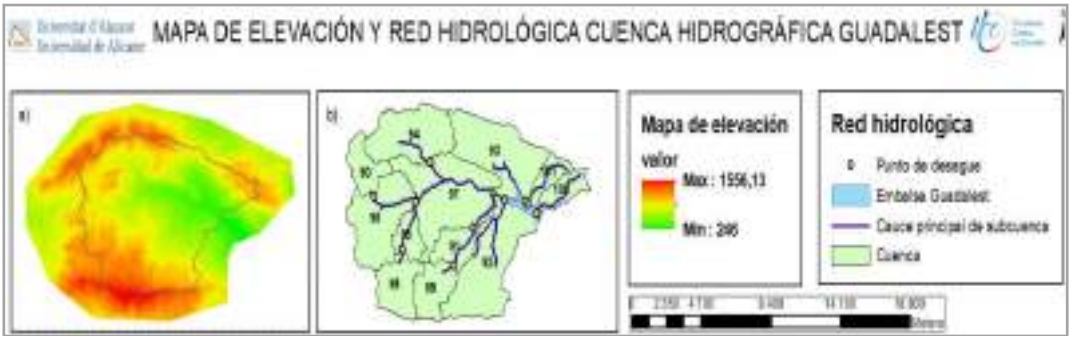


Figura 1. Mapa de elevación y red hidrológica Cuenca Hidrográfica Guadalest.

La orografía característica de la región en la que se enmarca la investigación tiene elevaciones de hasta 1400 m a distancias inferiores a 20 km de la línea de costa, dando lugar a procesos de concentración de la escorrentía muy rápidos (fast floods) que aumentan el riesgo de inundaciones repentinas (Conesa-García, 1985; Camarasa-Belmonte et al., 2016; Valdes-Abellan et al., 2017; Ballesteros et al., 2018; Nogueira de Andrade and Szlafsztein, 2018; Zhong et al., 2018). En cuanto a su geomorfología, las formaciones geológicas identificadas presentan deferentes litologías tales como: gravas, arenas, arcillas y limos de depósitos de glaciares y estribaciones, con algunas inclusiones de areniscas y calizas (IGME, 2018). La precipitación se distribuye de manera desigual a lo largo del año, con veranos secos y otoños que concentran la mayor parte de la precipitación. Los datos climáticos de precipitación y temperatura fueron proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2018).

La Cuenca del Embalse Guadalest se dividió en 12 unidades asignádoles códigos que van desde: 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, conforme se describe en la Figura 1b, es importante considerar de aquí en adelante éste codificación para el estudio desarrollado.

3. METODOLOGÍA

3.1 Fuentes de información

El modelo digital de elevación (DEM) fue obtenido en formato raster disponible de la página web del Instituto Geográfico Nacional, IGN (CNIG, 2017), con un tamaño de celda de 5m x de acuerdo con la metodología mostrada en (Tarboton, 1997). Este modelo digital de elevación fue prefiltrado usando herramientas GIS para eliminar sumideros y picos evitando así los sistemas de drenajes discontinuos. La información sobre el tipo de suelo y su permeabilidad fue obtenida del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en formato shapefile escala 1:50.000 (IGME, 2018).

La investigación del uso de la tierra y clasificación de la cobertura fue obtenida del Proyecto de Orden Ministerial Corine Land Cover, a partir de la información disponible en el IGN en formato vectorial tipo polígono, a escala 1:100.000 y con tamaño mínimo del polígono de 25 ha. Se valoraron cinco escenarios temporales de uso y ocupación del suelo según este proyecto para los años 1990, 2000, 2006, 2012 y 2018 y denominados en este trabajo como CLC1990, CLC2000, CLC2006, CLC2012, CLC2018 respectivamente.

3.2 Análisis de la información espacial, del uso del suelo y su evolución temporal

La red de drenaje en la cuenca vertiente se obtuvo utilizando el DEM a través de un proceso automatizado mediante el uso de programas SIG. La genereración de escorrentía en la cuenca fue estimada a partir de la combinación de la información de usos del suelo, tipo y permeabilidad del suelo y pendiente (clasificada esta última en dos grupos: 0 %-3 % y >3 %). Cada combinación de los anteriores factores fue asimilado a un umbral de escorrentía de acuerdo a la norma española 5.2-IC

(BOE, 2016), la cual está basada en el método racional. A continuación, la extensión total de la cuenca fue subdivida en 12 unidades o subcuencas tratando de respetar la red de drenaje previamente obtenida a partir del DEM y buscando la mayor homogeneidad en cuanto a generación de escorrentía en el interior de cada subcuenca. Se determinó para cada subcuenca las características de superficie, longitud y pendiente del cauce principal de su red de drenaje, tiempo de concentración, tipos de suelo, tipos de vegetación, cambio de uso del suelo.

3.3 Modelización hidrológica

La respuesta hidrológica de la cuenca en los diferentes escenarios considerados de uso del suelo fue obtenida mediante el uso del modelo HEC-HMS. El modelo HEC-HMS usado en esta investigación, está basado en la física y se puede aplicar a una amplia gama de casos, como los impactos del cambio climático en los recursos hídricos (Abbaspour, 2018), prácticas de gestión de tierras sobre agua, el transporte de sedimentos y los rendimientos químicos agrícolas en cuencas hidrográficas calibradas y no calibradas (Rouholahnejad, 2014). Las mejoras recientes en la resolución del modelo de tiempo permiten simular con periodos de tiempo en minutos, colocando a HEC-HMS como una herramienta adecuada para realizar estudios de inundaciones repentinas (Boithias, 2017; Jeong, 2016); la versión utilizada en la presente investigación es la 4.4.y la simulación se ejecutó a escala diaria. Los elementos hidrológicos disponibles son: subcuenca, alcance, unión, reservorio, desvío, fuentes y sumideros, los cuales están conectados en una red para simular un proceso de escorrentía-lluvia; la computación procede de elementos aguas arriba a la dirección aguas abajo y dispone de una clasificación de diferentes métodos para simular pérdidas de infiltración.

El número de la curva es un concepto que fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Mishra & Singh, 2003) y que informa sobre la capacidad de generación de escorrentía. En este trabajo se estableció una relación lineal directa entre este concepto y el del umbral de escorrentía recogido en la normativa española. Se establecieron 5 modelos diferentes, cada uno asociado al periodo de 6 años inmediatamente cuyo año final se cooresponde con el año asociado del uso del suelo según los escenarios anteirormente indicados (CLC2012 abarca los años 2007-2012); el intervalo de tiempo computancial fue de un día (Jeong, 2016).

El tratamiento de propagación de avenida a lo largo de los diferentes cauces considerado para este estudio se representa por el modelo lineal de almacenamiento de acuerdo con el método de enrutamiento de Muskingum (Cunge, 1969; Overton, 1966; Villón Béjar, 2014), el cual fue desarrollado por el Servicio de Conservación del distrito de Muskingum, Ohio, USA, para la prevención de avenidas. Este método utiliza dos parámetros denominados K y X; para K se adoptó un valor de 0.6 del tiempo de respuesta, que es el tiempo de tránsito de la onda de flujo en los hidrogramas medidos y atendiendo a las características del canal de las cuencas y las experiencias de Cunge (1969) y Overton (1966); y para el caso del parámetro X que depende de la forma de almacenamiento y cuyo valor en cauces naturales se encuentra entre 0 y 0.3 se utilizó un valor de 0.2 de acuerdo con Neitsch et al. (2011).

Una herramienta útil es la aplicación de modelos empíricos, como el método de curvas numéricas desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS–CN) de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, 1972). Este método aplicable a pequeñas cuencas agrícolas, previa estimación de la retención máxima potencial de agua del suelo y la precipitación, permite estimar el escurrimiento con precisión aceptable (Sánchez et al., 2003). Rawls et al. (1993) mencionaron que la cubierta terrestre (CN, en adelante) refleja las condiciones de infiltración del suelo, las prácticas de manejo de los terrenos agrícolas, la condición antecedente de la lluvia y la cobertura del suelo, que relacionan la infiltración y el ES. El valor de la CN varía de 0 a 100, CN es igual a 100 para superficies impermeables y superficies de agua, y en superficies naturales es menor de 100 (Chow et al., 1988); por lo que, con valores cercanos a 100 se tendrá el máximo escurrimiento.

La evapotranspiración potencial se simuló con el método Hargreaves et al. (1985) a partir de la localización de la zona de estudio y de las series temporales de precipitación, temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin). Se obtuvieron estos registros diarios de Tmáx y Tmín de las estaciones meteorológicas 8041I-Guadalest y 8040-I ubicadas en la localidad de Guadalest y en el propio cuerpo de presa respectivamente. Los escasos huecos presentes en la serie temporal de dichas estaciones fueron completados con información de las estaciones 8025 para el caso de la temperatura (correlación de más del 91 % entre los registros de ambas estaciones) y de las estaciones 8040 y 8040C (correlación de 59 y 53 % respectivamente).

Con respecto a la pluviometría se menciona que considerando los cinco escenarios: (1984-1989), (1990-1999), (2000-2005), (2006-2011) y (2012-2017), se determinó la variación promedio anual siguiente: 375.21mm, 263.78mm, 271.20mm, 352.716mm, y 249.96mm respectivamente identificando el valor más bajo para el escenario final. En la Figura 2 se presentan los datos meteorológicos observados en la estación 8025 (Koutsoyiannis et al., 1998) los cuales fueron seleccionados ya que la estación mencionada presentó los registros diarios más largos y la menor presencia de brechas.

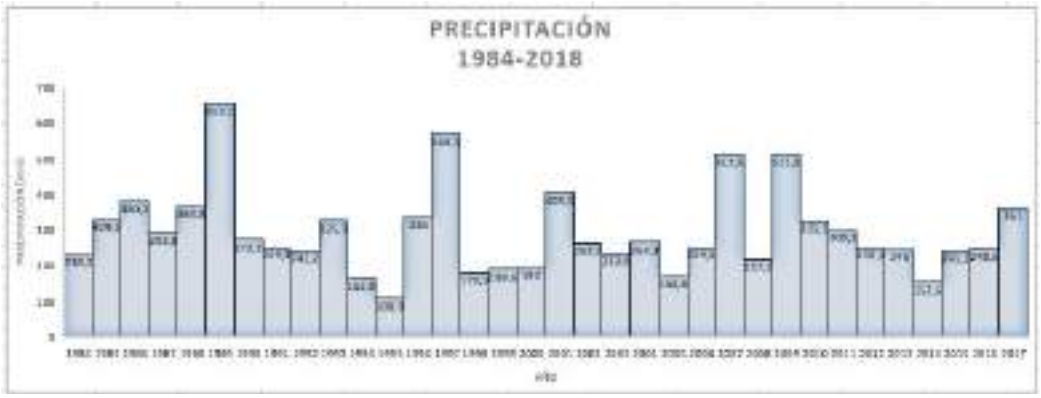


Figura 2. Serie temporal de precipitación total anual en el periodo 1984-2018.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo del tiempo, se observa cambios en los tipos de suelo: los escenarios iniciales (1990-2000) mostraron principalmente áreas de vegetación esclerófila y patrones de cultivo, mientras que los escenarios actuales (2006, 2012 y 2018) presentan zonas de pastizales naturales, bosque de coníferas, árboles frutales. Estos cambios en las clases de uso del suelo responden al requerimiento y demanda antropogénica enfocada principalmente a ganadería y plantaciones frutales y la alta presión demográfica descrita en (Conesa García, 1985; Ayala Carcedo et al., 2007; Ballesteros et al., 2017), a lo largo de la costa sudeste de España durante los últimos años y, en la costa de las provincias de Alicante y Murcia (Pérez-González, 2002). Por otro lado, se detectó un cambio en el uso de la tierra agrícola durante el período estudiado (1984-2018) con una disminución de (-5,72 %) y (-6,23 %) en las subcuencas 96 y 92 respectivamente de lo que se tenía en los años (1990, 2000 y 2006); en cambio apareciendo un ligero uso en agricultura en el 2012 y 2018 de (2,48 %) y (3,05 %). Según estudios recientes realizados en el SE de España (Alonso-Sarría et al., 2016; García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; Rodrigo-Comino et al., 2018), el abandono observado de las áreas agrícolas se debió a factores relacionados, con el clima, y limitaciones topográficas como la ocurrencia de pequeños deslizamientos de tierra, así coomo numerosos factores socioeconómicos derivados de las Políticas Agrícolas Europeas, usos intensivos inadecuados de la tierra, entre otros.

4.1. Variaciones del Número de Curva

En la figura 4 se presenta el cambio de uso de suelo desde 1990 hasta 2018, además se visualiza las diferencias identificadas en los niveles de CN2 de áreas de vegetación esclerófila, zonas de pastizales naturales, agrícolas y plantaciones frutales, se muestran los cinco escenarios con las mayores diferencias del valor de CN en todas las subcuencas, siendo en menor magnitud en las subcuencas 93,100 y 101 y mayor en el resto de las subcuencas atribuible al cambio de uso del suelo y su incidencia en factores de infiltración e impermeabilización.

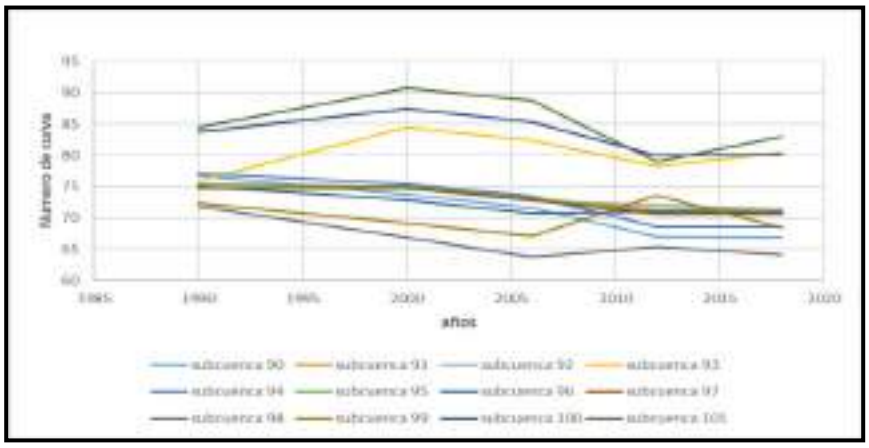


Figura 3. Variación multitemporal del número de curva.

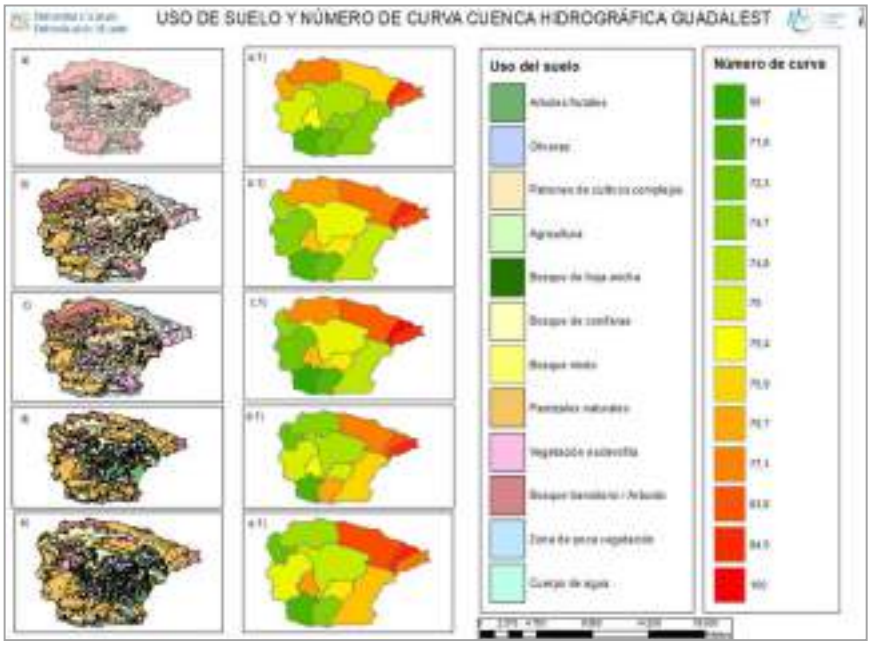


Figura 4. Mapas de uso de suelo y número de curva en los años (a) y (a.1) 1990 (b), y (b.1) 2000(c) y (c.1), 2006 (d) y (d.1), 2012 (e) y (e.1) y 2018 en la cuenca vertiente al Embalse de Guadalest

4.2. Caudales y precipitaciones

Del análisis hecho a la serie histórica de precipitaciones (1984 al 2018), aplicando las herramientas estadísticas media móvil y tendencia, se determina el componente cíclico y la tendencia de la precipitación. La parte cíclica marca aproximadamente 5 años para cada ciclo sea lluvioso o menos lluvioso, correspondiendo a este último el periodo de 2013 a 2018. Los caudales deben comportarse de una manera similar a las lluvias si las subcuencas no están muy alteradas, es decir los caudales

disminuyen ya que la lluvia decrece en términos anuales y multianuales; esto se corrobora tras establecer una correlación de 0.815 entre precipitación y caudales, es decir los caudales no presentan un comportamiento diferente a la lluvia (Fig.5) al analizar que en las subcuencas no se ha dado un mayor cambio en el uso del suelo.

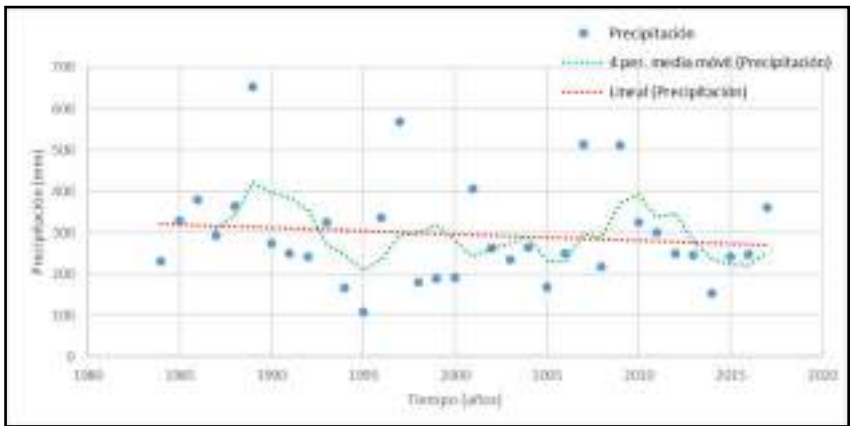


Figura 5. Media móvil y tendencia 1984-2018.

4.3. Resultados de la modelación con HEC-HMS para los cinco escenarios

Las descargas máximas se generaron para cada subcuenca y en la salida al embalse; al establecer el análisis estadístico con los datos de precipitación y caudales anuales, existe una buena correlación entre estos parámetros con un coeficiente de determinación de 0.6639 y un coeficiente de correlación de 0.815, aspecto que será contrastado a futuro con la evolución que ha tenido la cuenca en el cambio de suelos.

Se consideraron los picos obtenidos del modelo del 01 de octubre de 1986 = 137.9 m^3/s; 21 de febrero de 1992 = 82 m^3/s; 17 de abril de 2003 = 60.3 m^3/s; 13 de octubre de 2007 = 96.6 m^3/s; 22 de enero de 2017 = 84 m^3/s, estos valores están altamente correlacionados con la lluvia. Se estableció que la tendencia de la escorrentía es dependiente de la cantidad de lluvia recibida en todas las subcuencas determinándose como crecidas según el resultado del modelo y comprobado con los datos observados.

El modelo HEC-HMS es particularmente adecuado para los escenarios de uso de la tierra y sus implicaciones en los procesos hidrológicos a escalas regionales y globales durante los plazos seleccionados.

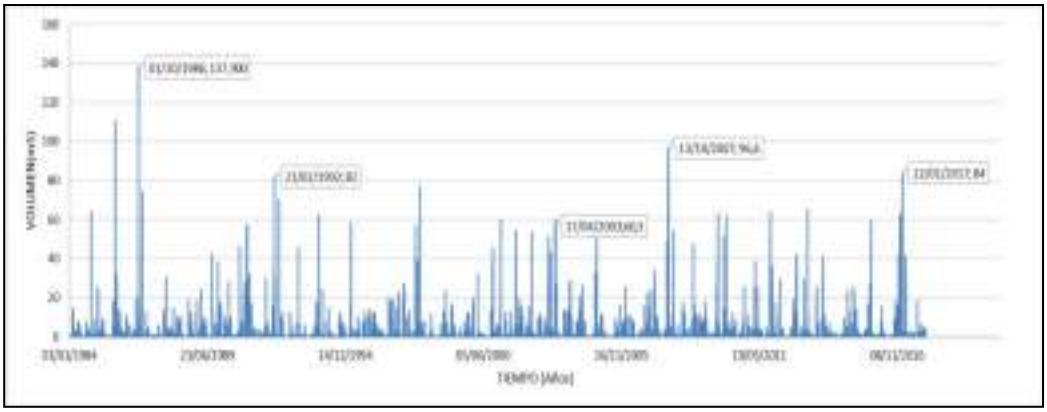


Figura 6. Caudales de 1984 al 2018 y picos de caudales.

ESCENARIO	VARIACIÓN PROMEDIO ANUAL DEL CAUDAL m^3/s	VARIACIÓN PROMEDIO ANUAL PRECIPITACIÓN mm
1984-1989	15.73	375.21
1990-1999	15.00	263.78
2000-2005	15.61	271.20
2006-2011	20.26	352.716
2012-2017	14.80	249.96

Tabla 1. Resultado de los cinco escenarios del promedio anual del caudal y del promedio anual de la precipitación.

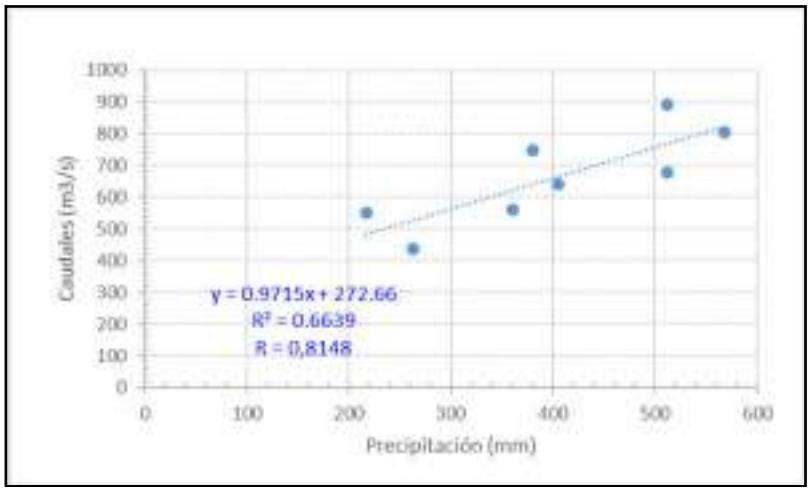


Figura 7. Correlación precipitación caudales anuales de la cuenca.

5. CONCLUSIÓN

El estudio realizado en los últimos 34 años (1984–2018) en la cuenca del Embalse de Guadalest, permite establecer cambios en el uso del suelo, pasando de vegetación esclerófila en un esenario inicial a pastizales naturales en el esenario más nuevo. Se identificó un ligero abandono de las zonas agrícolas, migrando a pastizales naturales y bosque de coníferas, lo que ha incidido en decrecimientos de los valores del número de curva en todas las subcuencas, con magnitudes menores en las subcuencas 93, 100 y 101. El modelo HEC-HMS diario implementado y las herramientas basadas en SIG han demostrado ser útiles al realizar los objetivos del estudio. Dentro del HEC-HMS, el modelo Green-Ampt Mein-Larson y el método Muskingum fueron adecuados para resolver, respectivamente, la conversión lluvia-escorrentía y las ecuaciones de propagación de inundaciones.

Los resultados obtenidos pueden aportar en la gestión del agua en la toma de decisiones contra los efectos del cambio climático, se analiza el comportamiento luvia-caudales en la cuenca y por otro lado el cambio de uso de suelo, en el primer aspecto exite una tendencia decreciente de la lluvia en el periodo 1984 a 2018, que incide en la disminución de los caudales, en el segundo aspecto el cambio de uso de suelo a modificado los parámetros de evaporación e infiltración que también inciden en la disminución de la escorrentía de la cuenca Existe un aumento del riesgo identificado en la ocurrencia de tormentas de alta intensidad como consecuencia del cambio climático.

Finalmente, este modelo permitirá realizar más investigaciones en las cuencas hidrográficas evaluadas relacionadas principalmente con el cambio de uso de tierra a pastizales, así como el abandono de las áreas agrícolas, importantes en las subcuencas y su influencia esperada en las tasas

máximas de escorrentía. Se indica que las expansiones de tierras de cultivo conducen a la disminución de la evapotranspiración general, con un aumento de la escorrentía; además se presenta información valiosa de los cambios posteriores en los componentes hidrológicos como resultado del cambio de uso del suelo para la predicción futura, que puede ser útil en el desarrollo de políticas de gestión para conservar los bosques. El modelo HEC-HMS utilizado, con la información implementada, puede proporcionar futuros escenarios hidrológicos, a los planificadores para la toma de medidas previas para el uso sostenible del agua.

REFERENCIAS

- Abbaspour, K., Srinivasan, R., Ashraf Vaghefi, S., Faramarzi, M. & Chen, L. (2018). *Integrated Soil and Water Management: Selected Papers from 2016 International SWAT Conference*. MDPI, Basel. https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-816-9
- AEMET (2018). *Agencia Nacional de Metereología*. http://www.aemet.es
- Ayala Carcedo, F.J., Olcina Cantos, J., Laín Huerta, L. & González Jiménez, A. (2007) *Riesgos naturales y desarrollo sostenible, impacto, predicción y mitigación*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Ballesteros, C., Jiménez, J.A. & Viavattene, C. (2017). Flood risk evaluation to multiple components on the coast of Maresme. *Ribagua*, 4(2), 110-129. https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1381453
- Belnap, J., Büdel, B. & Lange, O. L. (2001). Biological Soil Crust: Characteristic and Distriburion. En: J. Belnap & O. L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Ecological Studies (Analysis and Synthesis),* 150, 3-30. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_1
- Beven, K.J. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. Wiley-Blackwell, England.
- Boithias L., Sauvage, S., Lenica, A., Roux, H., Abbaspour, K. C., Larnier, K., Dartus, D. & Sánchez-Pérez, J. M. (2017). Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. *Water*, 9, 929. https://doi.org/10.3390/w9120929
- Boongaling, C. G. K, Faustino-Eslava, D. V. & Lansigan, F. P. (2018). Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land Use Policy,* 72, 116-128.
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 541, 99-115.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. Singapore.
- Conesa García, C. (1985). Inundaciones en Lorca (Murcia): Riesgo y Expectación. *Papeles de Geografía*, 10. https://revistas.um.es/geografia/article/view/41981
- CNIG. (2017). *Centro Nacional de Información Geográfica*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. https://www.cnig.es/servicios
- Gassman P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. & Arnold, J. G. (2007). *The soil and water assesment tool: historical development, applications and future research directions*. Transactions of the ASABE, 50(4), 1211-1250. https://doi.org/10.13031/2013.23637
- IGME (2018). *Instituto Geológico Minero de España*. Madrid. www.igme.es.
- IGME (2013). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*, 331-342. Instituto Geológico Minero de España, Madrid.
- Jeong, J. S., García Moruno, L., González Gómez, D. & Carver, S. (2016). Implementación de un método para alcanzar un paisaje resiliente mediante la ubicación apropiada de edificaciones rurales. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 16(1), 19-38. https://doi.org/10.7201/earn.2016.01.02
- Koneti, S., Sunkara, S. L. & Sarathiroy, P. (2018). *Hydrological Modeling with Respect to Impact of Land-Use and Land -Cover Change of the Runoff Dynamics in Godavari River Basin Using*

the HEC-HMS Model. Centre for Earth Ocean and Atmospheric Sciences, University of Hyderabad, 2-17.

- Kosztra, B., Büttner, G., Hazeu, G. & Arnold, S. (2019). *Updated CLC Illustrated nomenclature guidelines*. European Topic Centre on Urban, land and soil systems (UTC/ULS), European Environment Agency, Austria.
- Martínez Ibarra, E. (2010). La inundación extraordinaria del 12 de octubre de 2007 en Calpe (Alicante, España): una perspectiva geográfica. *Cuadernos de Geografía*, 87, 89-110. http://hdl.handle.net/10550/31504
- Mishra, S.K. & Singh, V. P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology* (Primera ed.). Springer, Dordrecht.
- Mohedas Díaz, M. & Moreno Vega, A. (2015). *UF0700 - Trabajos de infraestructuras forestales*. Paraninfo, Madrid.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool. Theorical Documentation*. Version 2009. Texas Water Resources Institute, Texas. http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf
- Pérez-González, A., Vegas Salamanca, J. & Machado, M. J. (2002). *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Pérez Morales, A., Gil Guirado, S. & García Martín, F.M. (2015). Veinte años de protección de cauces en el litoral de la Región de Murcia (1194-2014). Evaluación de la eficiencia de las medidas de Ordenación del Territorio. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*, 35(1), 169-185. http://dx.doi.org/10.5209/rev_AGUC.2015.v35.n1.48969
- Petchprayoon, P., Blanken, P.D., Ekkawatpanit, C. & Hussein, K. (2010). Hydrological impacts of land use/land cover change in a large river basin in central–northern Thailand. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1917-1930. https://doi.org/10.1002/joc.2131
- Rao, K. H. V. D., Rao, V. V., Dadhwal, V. K. & Sharma, J. R. (2011). A distributed model for real-time flood forecasting in the Godavari Basin using space inputs. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2, 31-40. https://doi.org/10.1007/s13753-011-0014-7
- López-Chicano, M., Calvache, M. L., Martín-Rosales, W. & Gisbert, J. (2002). Conditioning factors in flooding of karstic poljes, the case of Zafarraya polje. Catena, 49(4), 331-352. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00053-X
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., Bacu, V. & Lehmann, A. (2014). Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution. *Water Resources Research*, 50(7), 5866-5885. https://doi.org/10.1002/2013WR014132
- Tarboton, D. G. (1997). A newmethod for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. https://doi.org/10.1029/96WR03137
- Teng, F., Huang, W. & Ginis, I. (2018). Hydrological modeling of storm runoff and snowmelt in Taunton River Basins by applications of HEC-HMS and PRMS models. *Natural Hazards*, 91, 179-199. https://doi.org/10.1007/s11069-017-3121-y
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A. y Tenza-Abril, A. J. (2017). Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology,* 37, 1285-1296. https://doi.org/10.1002/joc.4984
- Vielca Ingiopsa Ingenieros (2013). *Plan Director de Defensa Contra las Avenidas en la Comarca de La Marina Baja (Alicante)*. Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia.
- Villón Béjar, M. (2014). *HEC-HMS Ejemplos* (Primera ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica, Costa Rica.
- Zheng, H., Chen, F., Ouyang, Z., Tu, N., Xu, W., Wang, X., Miao, H., Li, X. & Tian, Y. (2008). Impacts of reforestation approaches on runoff control in the hilly red soil region of Southern China. *Journal of hydrology*, 356, 174-184. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.007

RECIENTES EPISODIOS DE LLUVIAS E INUNDACIONES EN LA DEPRESIÓN PRELITORAL MURCIANA

Encarnación Gil-Meseguer
Profesora Titular de Análisis Geográfico Regional. Universidad de Murcia, España
encargil@um.es
https://orcid.org/0000-0002-4372-4127

Miguel Borja Bernabé-Crespo
Doctor por la Universidad de Murcia, España
miguelborja.bernabe@um.es
https://orcid.org/0000-0001-7269-3270

José María Gómez-Espín
Catedrático de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Murcia, España
espin@um.es
https://orcid.org/0000-0001-7287-4952

RESUMEN

Es un estudio diacrónico (1987-2020), de episodios de lluvias copiosas (60 mm y más en 24 horas) en la Demarcación Hidrográfica del Segura (área de la Depresión Prelitoral Murciana). Las estaciones meteorológicas se han seleccionado con criterios pluviométricos e hidrológicos, de crecidas e inundaciones relacionadas con la "gota fría" o DANA. En el Valle del Guadalentín sobresalen seis episodios repartidos entre 1989, 2012, 2016 y 2019. En la Huerta de Murcia, nueve episodios repartidos entre 1987, 2000, 2004, 2012, 2016, 2019 y 2020. Estos episodios ocasionaron crecidas no sólo en los ríos Guadalentín y Segura, sino también en multitud de barrancos y ramblas que confluyen en ellos. Estos no cuentan con elementos de regulación, y el abandono de presas de derivación y redes de boqueras imposibilitó la laminación de avenida y retrasar la presencia de estos caudales en el llano de inundación.

1. INTRODUCCIÓN

La región del Sureste Ibérico se ve atravesada de oeste a este por una depresión recorrida por los ríos Guadalentín y Segura. En su origen es una fosa tectónica resultado del hundimiento del Macizo del Segura y del papel de fallas como la de Alhama. Restos de los materiales adosados al Macizo del Segura son la sierra del Castillo en Alhama de Murcia, y la Cresta del Gallo, al sur de la capital.

El borde septentrional está enmarcado por los relieves de la sierra de Las Estancias y de Sierra Espuña, y el borde meridional por los relieves prelitorales de Almenara y Carrascoy. En ese borde norte sobresalen relieves como el Cabezo de la Jara, la Torrecilla, la Tercia, la Muela y el Cura. En el borde sur, la sierra de Enmedio divide la depresión en los pasillos de Almedricos y Puerto Lumbreras, además de los relieves de la Carrasquilla, El Puerto, Cresta del Gallo, y Miravete; a los que se unen los relieves en cuesta de los Villares, Columbares, Altaona y Escalona (Prieto *et al.,* 2009: 169).

Entre las cumbres de estos relieves y el fondo de la depresión hay toda una serie de depósitos de piedemonte (glacis y conos de deyección), a veces lacerados por barrancos y ramblas; que solo alcanzan los cursos del Segura y Guadalentín cuando las crecidas de estos pequeños tributarios aportan copiosos volúmenes de agua. Un caso a señalar es el de las ramblas de Vilerda y Nogalte, en

el sector más oriental, que en situaciones de crecida de caudales acostumbran a desaguar en la rambla de Viznaga, afluente del Guadalentín. En caso de una gran crecida, parte de esos caudales se derivan hacia el Almanzora por la erosión remontante de la rambla de Las Norias-Galán-Zaragatata-Pinar, favorecida por la labor de cosechero-exportadores al romper el Caballón de la Hoya (Figura 1), y la de la rambla de Nogantes-Charcones-Canalejas, al saltar parte del turbión el umbral de la Venta de Ceferino (Gil-Meseguer, 1987: 101 y 159).



Figura 1. Rotura del Caballón de la Hoya en Puerto Adentro. Fuente: Gil Meseguer, E. (07-02-2020).

2. METODOLOGÍA

El criterio para la selección de los episodios de lluvias ha sido la precipitación caída en cuanto a volumen (600 décimas de mm y más en 24 horas) que ocasiona crecidas de los cursos de agua e inundación en las áreas de estudio. Los datos han sido proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con los que se han elaborado las Tablas 1 y 2. En ellas se recogen las estaciones con más de 600 décimas de mm, que son para la subárea del Valle del Guadalentín:

- 7211 Puerto Lumbreras CHS y 7211B Puerto Lumbreras, a 465 m
- 7209 Lorca y 7209E Lorca San Julián, a 310 m
- 7205 Lorca (Emb. Puentes), a 450 m
- 7214 Totana (Alquerías), a 799 m
- 7216 Totana (Mortí), a 480 m
- 7221B Alhama (Ceña Guerrero). a 167 m
- 7221F Alhama (El Praíco), a 210 m
- 7227 Alhama (Comarza) y 7227X Alhama (Comarza), a 167 m
- 7226 Librilla CHS, a 180 m.

Y para la subárea de la Huerta de Murcia:

- 7177 Murcia Los Guillermos, a 220 m
- 7178I Murcia, a 61 m
- 7182 Murcia Alfonso X, a 57 m
- 7228 Murcia/Alcantarilla, a 75 m
- 7229A Murcia (El Valle), a 140 m
- 7231 Murcia (Beniaján), a 50 m
- 7232 Santomera, a 36 m
- 7233A Murcia-Orilla del Merancho, a 33 m
- 7244 Orihuela “Los Desamparados”, a 26 m

El valor de los datos de estos observatorios es bastante fiable, para el caso de Murcia capital la serie de temperaturas y precipitaciones mensuales apenas tiene lagunas (anomalías) y se extiende más de cien años, desde 1863 y continua, aunque la estación ha cambiado su ubicación hasta el actual, en la pedanía murciana de Guadalupe (Gil-Guirado y Pérez-Morales, 2019: 34).

Para la intensidad de las lluvias se ha contado con datos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Demarcación Hidrográfica del Segura, especialmente para los episodios recientes del 2016, 2019 y 2020. Los datos del SAIH nos permiten indicar las intensidades horarias, pero es una fuente más reciente, desde los años ochenta del siglo XX; incluso podrían considerarse en intervalos de lluvia de cinco minutos, con objeto de estudiar estos episodios no sólo como recurso sino también en relación con el riesgo en medios semiáridos (Camarasa-Belmonte *et al.,* 2020: 12). Por su parte, para la vulnerabilidad se ha llevado a cabo una labor de hemeroteca de los diarios regionales La Verdad y La Opinión. También los informes de Concejalías de Ayuntamientos y Consejerías de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM) sobre los efectos de las inundaciones.

3. RESULTADOS

Las Tablas 1 y 2 muestran los episodios de lluvias intensas en las dos subáreas de estudio: el valle del Guadalentín (sector oeste de la Depresión Prelitoral Murciana) y la Huerta de Murcia (sector este de la Depresión Prelitoral Murciana).

Fecha	7211B	7209E	7205	7214	7216	7221B	7221F	7227X	7226
1987-11-04									680
1988-02-16			616	765					
1988-11-11						954	900		
1989-09-04								656	
1989-09-07	1070	845	920	620	825	775	685	950	700
1989-10-15	796	1340	742		600				
1990-09-02							635		
1991-01-23		600				700	673	650	645
1991-01-24								700	
1992-02-19	660					702	664	780	
1993-02-03				720					
1996-08-28								800	
1993-06-06					625				
1996-08-28									600
1997-06-18				600					
1997-09-28					663				
1997-09-29				1330	1280	1175		880	780
1997-09-30							1122		
1998-12-02				635					
1999-02-27				613		1023	1159	1030	1200
2000-10-22								680	
2000-10-23				610	972	725	1194	1220	890
2001-06-30									
2002-04-01				600					
2002-06-30			650	610					
2004-03-28				600	630				
2004-04-15				750				670	
2007-01-26	674								
2007-01-27	830			855					
2008-10-20				640					
2008-10-21					680				
2009-03-03	646						688	756	680

Fecha	7211B	7209E	7205	7214	7216	7221B	7221F	7227X	7226
2009-09-27				640				620	
2009-09-28					650				
2010-01-25								620	
2012-09-28	2042	1006	1090	925	930	1065	1148	882	950
2013-08-29			693						
2016-12-17				914		707	771	742	
2016-12-18				1398		676	1100	1108	
2019-04-19				693		606	844	794	
2019-09-12	952		917	607		647	1021	980	
2019-12-02				650					
2020-03-23				605					
2020-03-24				747					

Tabla 1. Episodios de lluvias copiosas en el Valle del Guadalentín, en décimas de mm, para el periodo 1987-2020. Fuente: elaboración propia con datos de AEMET (2020).

En la subárea del Valle del Guadalentín (sector oeste de la fosa tectónica) sobresalen los episodios del 7 de septiembre de 1989 (Figura 2), con 1070 décimas de mm en Puerto Lumbreras, a 465 metros snm; y del 15 de octubre de 1989, con 1340 décimas de mm en Lorca, a 310 metros snm.



Figura 2. Avenida del 7 de septiembre de 1989 en la rambla de Nogalte, a su paso por Puerto Lumbreras. Fuente: Cristóbal Navarro de Fotos Maís en Puerto Lumbreras.

El mayor volumen de precipitación se produjo el 28 de septiembre de 2012, con 2042 décimas de mm en Puerto Lumbreras, a 465 metros snm y 1148 décimas de mm en Alhama de Murcia (El Praíco), a 210 metros snm. También son de destacar algunos episodios del 17 y 18 de diciembre de 2016, con 1398 décimas de mm en Totana (Alquerías) a 799 metros snm. El 18 de diciembre de 2016 también alcanzaron más de 1100 décimas de mm de precipitación los pluviómetros de Alhama (El Praíco) a 210 metros snm. y Alhama (Comarza) a 167 metros snm. El 18 de diciembre de 2016, según los datos del SAIH, se acumularon en el Canal Principal del Campo de Cartagena, a la altura de Pilar de la Horadada 34 mm en una hora, en Jacarilla 35,7 y 42,8 mm en el Embalse de la Pedrera.

El 19 de abril del 2019 se registraron 844 décimas de mm en Alhama (El Praico), y 1021 décimas de mm el 12 de septiembre de 2019 en el mismo observatorio.

Fecha	7177	7178I	7182	7228	7229A	7231	7232	7233A	7244
1987-10-04		653							
1987-11-04		991	1200	998	1200	1465	1580		3160
1988-05-11							700		
1988-09-30						650			
1989-03-19			840						
1989-09-04				700			810		1000
1989-09-07		613			700		670		730
1991-01-23			645	697	810	1100			
1991-01-24					730				
1993-02-04									799
1995-09-23							690		
1997-06-18		643							637
1997-09-29							630		770
1998-12-02			696						
1999-09-06							605		
1999-09-07					695				
2000-10-22									
2000-10-23		935	900	866	610		1320		1149
2004-04-15		844	661	659	840	600	725		840
2009-09-27					650				
2010-06-14								745	
2010-08-13				627					
2012-09-28	820	642	799	1002		660	738	800	717
2014-09-22								793	
2015-09-05	700			667					
2016-12-04	897								
2016-12-17	860		647	669					
2016-12-18	1090	1092	1150	1124			1079	1050	1091
2017-01-19							881		765
2017-03-13									660
2017-03-19							601		
2018-11-15								800	
2019-04-19	770	790	729	776			972	950	738
2019-09-12	1440	1690	1720	1797			2153	1462	2308
2020-03-23		648	715	683				660	

Tabla 2. Episodios de lluvias copiosas en la Huerta de Murcia, en décimas de mm, para el periodo 1987-2020. Fuente: elaboración propia con datos de AEMET (2020).

En la subárea de la Huerta de Murcia (municipios de Murcia, Alcantarilla, Santomera y Beniel), el 4 de noviembre de 1987 se registraron valores superiores a las 1000 décimas de mm en la mayor parte de los observatorios; y en Orihuela "Los Desamparados" se alcanzaron las 3160 décimas de mm, a 26 metros snm. El 23 de octubre de 2000 se registraron 1320 décimas de mm en Santomera, a 36 metros snm. El 15 de abril de 2004, destacan las 844 décimas de mm en Murcia, a 61 metros snm, y las 840 décimas de mm en Murcia "El Valle", a 140 metros snm, y en Orihuela (Los Desamparados) a 26 metros snm.



Figura 3. Protección de cultivo de cítricos ante avenidas en la rambla de Los Romos. Fuente: Gil Meseguer, E. (24-12-2019).

La situación del 28 de septiembre del 2012 generó intensas lluvias en la Huerta de Murcia. Destacan las 1002 décimas de mm en Murcia/Alcantarilla, a 75 metros snm. Las lluvias fueron más abundantes el 17 y 18 de diciembre de 2016, con 1150 décimas de mm en Murcia "Alfonso X", a 57 metros snm, el 18 de diciembre.

El 2019 ha sido año de copiosas lluvias: el 19 de abril de 2019 se registraron 972 décimas de mm en Santomera y el 12 de septiembre de 2019 se registraron 2308 décimas de mm en Orihuela "Los Desamparados". El primer trimestre del 2020 también ha sido lluvioso, sobre todo los días 23 y 24 de marzo, con varios observatorios que superaron los 60 mm/día.

4. DISCUSIÓN

La gestión del agua se enfrenta al reto de escenarios de cambio climático en el que serían más frecuentes sucesos extremos, como sequías e inundaciones, que podrían generar dificultades (fallo de garantía de suministro) para satisfacer la demanda hídrica y alimentaria de una población en crecimiento (Gil-Meseguer et al., 2020: 104).

Los días 3 y 4 de noviembre de 1987 se produjeron abundantes lluvias en el Levante español. La tromba de agua estaba ligada a la trayectoria de una depresión fría en altura (DANA) que, con sentido ciclónico, descendió de Valencia al límite entre las provincias de Alicante y Murcia y hacia el Mar Menor. En la madrugada del día 4 descargó en el sector oriental de la Depresión Prelitoral Murciana, con más de 100 mm/día en la mayor parte de observatorios (99,1 mm en Murcia Guadalupe y 99,8 mm en Alcantarilla Aeródromo). En la ciudad de Murcia se originaron dificultades en los desplazamientos por la imposibilidad del alcantarillado de evacuar estos caudales (de ellos 49 mm en una hora). La tromba de agua se tradujo en una crecida espectacular de todos los barrancos, cañadas y ramblas (Gil Meseguer, 1988: 178).

La torrencialidad de la avenida del 4 de noviembre de 1987 se tradujo en destrucción de abancalamientos con enormes "trenques". Las aguas turbias excavaron caminos y destrozaron los viales e infraestructuras de riego. Los caudales de agua de la rambla del Garruchal, que apenas fueros dispersados en su cono de deyección por el riego eventual de la Boquera de Tiñosa (debido al

abandono y a la ocupación por viales y urbanización) originaron que las canalizaciones de aguas turbias (boqueras secundarias) cortaran la carretera a San Javier a su paso por Beniaján, la línea de ferrocarril de Murcia a Alicante y Cartagena, e inundaron parte de las huertas de Beniaján, Torreagüera y Los Romos.

La rambla de Los Romos respondió de forma más catastrófica. El desagüe de la Boquera de Tabala, frenado por el puente del ferrocarril y el de la carretera, depositó más de medio metro de tarquines enterrando olivos hasta la cruz. Los caudales de la boquera derribaron postes del tendido eléctrico, cubrieron plantaciones de agrios y fueron suficientes para causar la catástrofe de Beniel, inundando la huerta junto a gran cantidad de viviendas y personas que tuvieron que ser evacuadas (Gil Meseguer, 1988: 180).



Figura 4. Aliviadero de la Boquera de Tiñosa, en la margen izquierda de la rambla del Garruchal. Fuente: Gómez Espín, J. Mª. (15-09-2019).

La avenida del 4 de noviembre de 1987 puso de manifiesto la necesidad de regular las pequeñas cuencas (43,2 km2 la del Garruchal y 32,0 km2 la de Los Romos). Por ello, unos años más tarde, la Confederación Hidrográfica del Segura compró unos terrenos cerca del Puntarrón Chico para levantar una presa de laminación de avenidas, pero han pasado más de treinta años y todavía no se ha construido.

El 28 de septiembre de 2012 se recogieron en el sector oeste de la Depresión Prelitoral más de 150 mm en dos horas. Lluvias de fuerte intensidad horaria debidas a la combinación de una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) y aguas más cálidas en el Mediterráneo Occidental. El resultado de estas lluvias copiosas e intensas fueron crecidas y desbordamientos de ramblas como las de Las Norias, Charcones-Nogantes-Canalejas, Goñar, Vilerda, Nogalte, Béjar, La Torrecilla, Viznaga, etc., y de los ríos-rambla Almanzora y Guadalentín. El umbral rojo de alerta (60 mm/hora, torrencial) se superó al mediodía, entre las 13 y 14 horas: Embalse de Cuevas del Almanzora (98,7 mm/hora), El Saltador (87,7 mm/hora), Puerto Lumbreras (119,6 mm/hora); y entre las 14,20 y 15,20 en Lorca se registran 67,6 mm/hora y en Totana 69,0 mm/hora. El umbral naranja (30 mm/hora, muy fuerte) se registró en la ciudad y Huerta de Murcia, vega Baja y litoral desde las 16 a 17 horas (Gil, Pérez y Gómez, 2012: 79).

En la avenida de San Wenceslao del 28-09-2012, las crecidas de las ramblas de Vilerda, Nogalte, Béjar y La Torrecilla, en su desagüe al Guadalentín a través de la rambla de Viznaga, originaron un continuo de área inundada de más 11 600 ha, por las dificultades a dar salida a las aguas que ocasionó el trazado de la autovía de Lorca a Águilas (poco permeable). Se anegaron cultivos, granjas, viviendas diseminadas, e incluso núcleos de población como la pedanía lumbrerense de la Estación-Esparragal, y las lorquinas de Campillo, Torrecilla, Aguaderas, Cazalla, La Hoya, La Escucha y Marchena (Gil, Pérez y Gómez, 2012: 81).

Los días 12 y 13 de septiembre de 2019, según los datos del SAIH de la DHS se registraron lluvias copiosas e intensa en toda la Demarcación Hidrográfica del Segura como consecuencia de esa combinación de DANA y aguas más cálidas en el Mediterráneo Occidental, con los máximos en la vega Baja (Orihuela con 486,6 mm, y Jacarilla con 362,4 mm). En el caso de la Huerta de Murcia destacan los valores de Reguerón (202,4 mm) y de Beniel (236,2 mm). En el sector más occidental de la Depresión Prelitoral los valores fueron menores, pero destacan los pluviómetros de Cabecera de la Rambla de Nogalte (141,8 mm), Rambla de Nogalte en Puerto Lumbreras (116,0 mm) y Lorca (103,8 mm). En cuanto a la intensidad horaria, se sobrepasó el umbral naranja (30 mm/hora) de intensidad horaria muy fuerte de las 01 a las 02 horas y de las 02 a 03 del 13 de septiembre de 2019 en los pluviómetros de Rincón de Beniscornia, Murcia/Autovía, y Reguerón. El día 12-12-2019 se había alcanzado la intensidad horaria muy fuerte de 11 a 12 horas y de 12 a 13 horas en Cabecera del canal de Crevillente y en el Embalse de Santomera, y en esas horas se alcanzó la intensidad horaria torrencial en Orihuela (97,2 mm, y 87,2 mm, respectivamente).



Figura 5. Avenida en el encauzamiento del Segura a su paso en la capital. Tramo frente al Hospital Reina Sofía. Fuente: Gómez Espín, J. Mª. (14-12-2019).

El encauzamiento del Segura se rompió a la altura del Raal, (en el margen izquierdo, en la mota, se abrió un portillo o trenque de más de 10 metros de largo), las aguas turbias lo aprovecharon para inundar cultivos, viviendas, almacenes, caminos, etc. A lo que se unió también en la margen derecha la salida de las escorrentías de la rambla de Los Romos y Boquera de Tabala, ampliando el saladar de la Boquera de Tabala y creando un gran almarjal, al dejar varios meses inundadas áreas de cultivos. Situación que afectó a pedanías como Zeneta y Alquerías, y al municipio de Beniel.



Figura 6. Área inundada por las aguas turbias de la avenida de la Boquera de Tabala. Fuente: Muñoz Garre, P. (22-01-2020).

5. CONCLUSIONES

Las lluvias copiosas pueden ser consideradas un recurso (recarga de acuíferos, acumulación de pluviales en embalses, etc.) y también un riesgo (cuando originan catástrofes si las lluvias además de abundantes son de fuerte intensidad horaria). Cuando en la cuenca de una rambla, como Nogalte, se producen lluvias de carácter extraordinario (como sucedió el 22 de octubre de 1948 con 240 mm, o una sucesión de varios días de abundantes lluvias como el 17, 18 y 19 de octubre de 1973: 29,5 mm, 69,7 mm, y 95,6 mm, respetivamente), las crecidas de escorrentías adquieren a veces tintes catastróficos al llevarse suelos, haciendas, y personas. A pesar de estos tristes sucesos (vulnerabilidad y riesgo) también se produce la recarga de freáticos próximos y profundos (recurso) (Gómez-Espín, 2004: 44). No olvidemos que el agua es un recurso limitado en regiones semiáridas (Gil-Meseguer, 2014: 39). No deben ocuparse los cauces de drenaje, ni reducir las dimensiones de los mismos; "el agua baja con sus *escriúras*"; los cauces han de estar limpios y bien delimitados, pues son las vías de circulación de las aguas naturales.

La catástrofe no sólo se ocasiona por la rotura de encauzamientos de ríos como el Segura (trenque en la mota) y la inundación del llano dónde además de los cultivos tenemos costosas infraestructuras, sino también por la aportación de pequeñas cuencas vertientes en las que se han abandonado abancalamientos y riegos de boquera para retardar y dispersar la avenida y que no han sido sustituidos por obras de regulación. Las diversas avenidas analizadas han puesto de manifiesto que es preciso ordenar el territorio con medidas para adaptarlo a estos sucesos lluviosos torrenciales. Así se ha hecho en la ciudad de Alicante (Morote y Hernández, 2017: 12); en municipios murcianos como Puerto Lumbreras dirigiendo las pluviales de las calles a embalses para acumulación y posterior uso en el riego, etc. Además, todo ello recupera una cultura del agua de técnicas de uso de pluviales (aterrazamientos, boqueras de vertiente, cajas de agua, aljibes, presa de derivación, riegos de turbias, etc.).

REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Murcia (2019). *Informe: Valorización aproximada de los daños en infraestructuras de pedanías de Murcia producidas por DANA los días 12 y 13 de septiembre de*

2019. Área de descentralización.
- Camarasa-Belmonte, A. M., Rubio Vila, M. & Salas Rey, J. (2020). Evolución de episodios pluviométricos en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (1989-2016). *Investigaciones Geográficas, 73*, 11-29.
- Cerdera, A. F. (2019). Llueve sobre Mojado. *Nova Ciencia, 154*, 20-23.
- Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente (2019). *Informe relativo a los daños ocasionados por las intensas lluvias producidas entre los días 11 y 15 de septiembre de 2019*. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Gil Guirado, S. & Pérez Morales, A. (2019). Variabilidad climática y patrones termopluviométricos en Murcia (1863-2017). Técnicas de análisis climático en un contexto de cambio global. *Investigaciones Geográficas, 71*, 27-54.
- Gil Meseguer, E. (1987). *Los relieves meridionales. Estudio Geográfico de los relieves litorales comprendidos entre la desembocadura del río Almanzora (Almería) y la de la rambla de Las Moreras (Murcia)*. Exmo. Ayuntamiento de Águilas y Universidad de Murcia.
- Gil Meseguer, E. (1988). El papel de las pequeñas áreas vertientes en las inundaciones de la Huerta de Murcia: las ramblas del Garruchal y Los Romos tras las precipitaciones del 4 de noviembre de 1987. *Papeles de Geografía, 14*, 167-183.
- Gil-Meseguer, E. (2014). El agua, un recurso limitado en regiones semiáridas: aprovechamiento y explotación del agua en medios semiáridos. En: J. Mª López Ballesta, *Phicaria, II Encuentros Internaciones del Mediterráneo: Uso y gestión de recursos naturales en medios semiáridos del ámbito mediterráneo*, 39-52. Universidad Popular de Mazarrón.
- Gil-Meseguer, E., Bernabé-Crespo, M. B. y Gómez-Espín, J. Mª (2020). Resiliencia en el consumo de agua por parte de abastecimientos y regadíos ante las sequías en el Sureste de España. *Cuadernos de Geografía, 104,* 107-130.
- Gil-Meseguer, E., Pérez Morales, A. & Gómez-Espín, J. Mª (2012). Precipitaciones y avenidas del 28 de septiembre de 2012 en el cuadrante suroccidental de la Cuenca del Segura (municipios de Lorca, Puerto Lumbreras y Pulpí). *Papeles de Geografía, 55-56*, 75-94.
- Gómez Espín, J. Mª. (2004). *Aprovechamiento integral del agua en la Rambla de Nogalte (Puerto Lumbreras-Murcia).* CAM Proyecto Agua, Ayuntamiento de Puerto Lumbreras y Universidad de Murcia, Murcia.
- Junta de Hacendados de la Huerta de Murcia (2019). *Valoración inicial de daños en infraestructuras de riego y drenaje.* Murcia, 7 de octubre de 2019. Departamento técnico.
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica) y CHS (Confederación Hidrográfica del Segura) (2019). *Estudio de precipitaciones brutas registradas en la Cuenca del Segura. (12 de septiembre de 2019-16 de septiembre de 2019, de 08,00 a 08,00).* SAIHSegura, Murcia.
- Morote Seguido, A. F. & Hernández Hernández, M. (2017). El uso de aguas pluviales en la ciudad de Alicante. De viejas ideas a nuevos enfoques. *Papeles de Geografía, 63,* 7-25.
- Prieto, A., Fernández, S. & Sancho, J. C. (2009). *Atlas de los paisajes de la Región de Murcia*. Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

RECIENTES EPISODIOS DE LLUVIAS E INUNDACIONES EN EL LITORAL DE LA REGIÓN DE MURCIA

Miguel Borja Bernabé-Crespo
Doctor por la Universidad de Murcia, España
miguelborja.bernabe@um.es
https://orcid.org/0000-0001-7269-3270

Encarnación Gil-Meseguer
Profesora Titular de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Murcia, España
encargil@um.es
https://orcid.org/0000-0002-4372-4127

José María Gómez-Espín
Catedrático de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Murcia, España
espin@um.es
https://orcid.org/0000-0001-7287-4952

RESUMEN

El trabajo se centra en el estudio de recientes episodios de lluvias (1987-2020) en el litoral de la Región de Murcia. Los relieves prelitorales de Almenara y Carrascoy encierran una serie de cuencas terciarias, entre las que sobresalen las de Águilas, Mazarrón y Campo de Cartagena-Mar Menor, conocidas algunas de ellas como campos litorales. El criterio para seleccionar los episodios, ha sido el volumen de precipitación igual o superior a 60 mm en 24 horas, y si han ocasionado crecidas e inundaciones. La mayoría de estas lluvias están ligadas a "gota fría" o DANA y han incrementado la vulnerabilidad de lugares del litoral como Los Alcázares (Murcia), provocando numerosos desperfectos y hasta la declaración de zona catastrófica. Se estudian los episodios de 17 y 18 de diciembre de 2016, los del 19 de abril y 12 de septiembre de 2019, y los del 23 y 24 de marzo de 2020.

1. INTRODUCCIÓN

El espacio comprendido entre las sierras prelitorales y el mar Mediterráneo corresponde a una serie de cuencas terciarias que se conocen como los campos litorales de Águilas, Marina de Cope, Pastrana-Ramonete, Mazarrón y Campo de Cartagena-Mar Menor.

Entre los relieves prelitorales destacan: la sierra de Enmedio, la de la Carrasquilla, Almenara, Carrascoy, El Puerto, Cresta del Gallo y Miravete, que mantienen la dirección NE-SO propia de las Béticas. A ellos se unen relieves litorales como Lomo de Bas-Las Moreras y las sierras de La Muela, El Algarrobo, Lo Alto y las de Cartagena (Pelayo, Gorda y Fausilla) (Prieto *et al.,* 2009: 207).

En este espacio litoral sobresale la cuenca del Campo de Cartagena-Mar Menor. Se trata de un amplio plano inclinado, basculado hacia el este, que arranca de los relieves de Carrascoy (1065 m), Sierra del Puerto (602 m) y Sierra de la Cresta del Gallo (518 m), a las que se adosan las primeras cuestas de Los Villares, Columbares, Altaona y Escalona.

Hacia el este, la parte más baja de la cuenca es una laguna sobresalada (Mar Menor) separada del Mediterráneo por una pseudorestinga, por un umbral rocoso mioceno con un sobrepuesto somero arenoso, que se conoce como La Manga (Lillo, 1978/79: 26).



Figura 1. Campo de Cartagena, Mar Menor, cercano a Los Alcázares, el 13 de septiembre de 2019. Fuente: Bernabé Crespo, M. B.

2. METODOLOGÍA

Se estudian varios episodios de lluvias según el criterio de copiosidad (60 mm y más en 24 horas), que ocasionan crecidas y, en la mayor parte de estos sucesos, también inundación. Para ello se han consultados varias estaciones de AEMET que figuran en las Tablas 1, 2 y 3. Estas son, para el sector de los campos litorales de Águilas y Mazarrón:

- 7001E Águilas (Montagro) 65 m
- 7002 Águilas Diputación 20 m
- 7002F Lorca (Campico López) 640 m
- 7003 Puntas de Calnegre 4 m
- 7003D Lorca (Los Curas) 95 m
- 7005B Mazarrón (San Telmo) 45 m
- 7007B Mazarrón (IOE) 3 m
- 7007 X Mazarrón (IOE Aut.) 3 m.

Para el sector del Campo de Cartagena – Mar Menor, en su parte litoral:

- 70011 Cartagena HE 15 m
- 7012C Cartagena 17 m
- 7013Cartagena Puerto 10 m
- 7016 Cartagena (El Algar) 40 m
- 7016U La Unión P. Civil 141 m
- 7017E Cartagena P.N. Calblanque 70 m
- 7019 Cartagena (Salinas de Cabo Palos) 1 m
- 7019B San Javier (La Manga) 4 m
- 7031O San Pedro del Pinatar (IOE) 9 m

Y para la parte más interior del Campo de Cartagena – Mar Menor:

- 7020 Murcia (Corvera) 280 m
- 7025 Murcia, Los Martínez del Puerto 160 m
- 7026 Cartagena (El Algar) 40 m
- 7026U Torre Pacheco y 7026X Torre Pacheco 50 m
- 7031 Murcia/San Javier y 7031X Murcia/San Javier II 4 m
- 7032 San Pedro del Pinatar Ayuntamiento 19 m
- 7024J Fuente Álamo (Balsapintada) 130 m
- 7029 Murcia (Sucina) 203 m
- 7022 Fuente Álamo (La Pinilla) 250 m

Para la intensidad de las lluvias se ha contado con datos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Demarcación Hidrográfica del Segura; especialmente, para episodios recientes del 2016, 2019 y 2020. Por último, en cuanto a la vulnerabilidad se ha llevado a cabo una labor de hemeroteca de los diarios regionales La Verdad y La Opinión, así como noticias elaboradas por profesores y alumnos del IES Antonio Menárguez Costa de Los Alcázares. También los informes de Concejalías de Ayuntamientos y Consejerías de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM) sobre los efectos de las inundaciones.



Figura 2. Ribera interior de la laguna sobresalada del Mar Menor (Santiago de La Ribera). Fuente: Gil Meseguer, E. (20-01-2020).

3. RESULTADOS

El espacio litoral, según lo reflejado en las tablas 1, 2 y 3, registró episodios de lluvias abundantes en 1987 los días 3 y 4 de noviembre (3300 décimas de mm en Murcia/San Javier II a 4 metros snm y 2032 décimas de mm en San Pedro del Pinatar Ayuntamiento, a 19 metros snm. También en 1993 (3 de febrero, 4 de mayo, 5 de mayo y 18 de octubre). El 3 de febrero se alcanzó el valor de 1450 décimas de mm en el observatorio de Cartagena HE, a 15 metros snm, y el valor de 1380 décimas de mm en el observatorio de Cartagena (El Algar), a 40 metros snm.

El 27 y 28 de septiembre de 2019 las lluvias fueron copiosas en el litoral con 1200 décimas de mm. en Cartagena (El Algar) a 40 metros snm; y 1120 décimas de mm en Lorca (Campico López), a 640 metros snm. Estas lluvias fueron provocadas por la acción de una DANA en el Sureste, combinada con un reservorio de aguas cálidas en el Mediterráneo, lo que genera abundantes lluvias y además de fuerte intensidad horaria. Situación como la que describía el Profesor Capel Molina en 1987:

"después del largo y cálido verano, de elevados índices de insolación, la superficie marítima litoral (Mediterráneo Occidental) conserva en parte sus caracteres de altas temperaturas y fuerte evaporación. Cuando una transgresión de aire polar en superficie (frente frío) o en niveles altos (vaguada planetaria o gota fría) alcanza las regiones meridionales de la Península Ibérica, crea una acusada y brusca inestabilidad dinámico atmosférica, desarrollando nubes convectivas cuyas cimas tocan el nivel de tropopausa" (Capel, 1987: 75).

Los días 17 y 18 de diciembre de 2016 las lluvias fueron copiosas en la mayor parte de observatorios analizados, con 1280 décimas de mm en San Pedro del Pinatar, a 9 metros snm y 1633 décimas de mm en Murcia/San Javier II, a 4 metros snm. El total de precipitación del 14 al 21 de diciembre de 2016 fue de 230,1 mm en Torre Pacheco y de 235,0 mm en San Javier II (el día 16 se recogió el 72,23 % del total de Torre Pacheco y el 67,36 % del de San Javier II). En El Estrecho, Rambla del Albujón (Cartagena) cayeron 41,2 mm en una hora el 18 de diciembre de 2016, y 44,1 en Pozo Estrecho; 40,2 en Torre Pacheco.

En abril de 2019 destaca el día 20 en el que hubo episodios de lluvias intensas en varios puntos de control del SAIH. En El Mirador (San Javier) se recogieron 24 mm en una hora el día 20 de abril. En Los Patojos (Cartagena), ese día se recogieron 28,4 mm en una hora. En otra estación de la Rambla de Benipila (Cartagena) 31,6 mm. En Canteras (Cartagena), 25 mm. En la Rambla del Cabezo Negro, cerca de Galifa (Cartagena), 32,8 mm. En Perín, 25,6 mm. En Torre Pacheco, 20,8 mm en una hora. En Fuente Álamo, 24,47 mm. En el Cedacero-La Azohía, 31,92 mm. En la Rambla de las Moreras (Mazarrón), 22,63 mm. En Camposol (Mazarrón), 25,6 mm.

El 12 de septiembre de 2019 se generalizaron lluvias abundantes en el litoral, con 3206 décimas de mm en San Javier (La Manga), a 4 metros snm y 2420 décimas de mm en Torre Pacheco, a 50 metros snm. Del 10 al 17 de septiembre de un volumen total de 264,0 mm en Torre Pacheco, el 50,98 % se recogía el día 12; y para un total de 222,8 mm en San Javier II, el 69,75 % se recogió el día 13.

En el Informe del SAIHsegura del 12 al 16 de septiembre de 2019 se recoge la precipitación acumulada esos días en ramblas costeras: La Murta (145,2 mm), Fuente Álamo (131,8 mm), El Estrecho (143,8 mm), Rambla del Albujón (165,2 mm), Torre Pacheco (221,2 mm), Pozo Estrecho (238,2 mm), Puebla (298,1 mm), La Escarihuela (90,2 mm), Perín (120,2 mm), Canteras (154,7 mm), Cartagena (123,2 mm), Benipila (128,3 mm), San Javier (201,4 mm), etc. Más del 75% de estos volúmenes cayeron del 12 al 13 de septiembre, y el resto de 13 al 14 de septiembre. La intensidad alcanzó el valor de torrencialidad (60 mm y más en una hora), en los intervalos de 01 a 02 horas, de las 08 horas del 12 a las 08 horas del 13; en los pluviómetros de Torre Pacheco (70,4 mm/hora), Pozo Estrecho (60,8 mm/hora) y La Puebla (78,0 mm/hora).



Figura 3. La llanura del Campo de Cartagena, Mar Menor anegada en las inmediaciones de Los Urrutias. Fuente: Bernabé-Crespo, M. B. (13/09/2019).

Recientemente los días 23 y 24 de marzo de 2020, en La Unión (Protección Civil) se registraron 1200 décimas de mm, a 141 metros snm (el 23); y 1350 décimas de mm en Cartagena (El Algar), a 40 metros snm (el 24). El 24, se acumularon en la estación del SAIH en Rambla de Benipila (Cartagena) 21,4 mm en una hora.

Fecha	7001E	7002	7002F	7003	7003D	7005B	7006	7007B	7007X
1988-06-07							720		
1989-09-07	650						980		
1989-10-15	1150	1690							
1992-02-19				658					
1993-02-03						670			
1993-05-04				829					
1993-05-05						615			
2000-10-22					656				
2000-10-23						830			
2003-11-18								680	
2003-11-19			640						
2003-12-09			600						
2004-04-15			640						
2006-05-03		1034	610						
2006-05-04	740								
2007-01-26								1000	
2009-03-03			1100						
2009-09-27			860						1018
2009-09-28								1800	
2010-08-16		712			1650				
2012-09-28			1120		600				
2016-12-17		625	690					600	862
2016-12-18			700						
2017-03-03	600								
2019-04-21					675				
2019-09-12			840						
2020-03-24					610				

Tabla 1. Episodios de lluvias copiosas en el litoral de Águilas, Lorca y Mazarrón, periodo 1987-2020. Fuente: elaboración propia con datos de AEMET (2020).

Fecha	7011	7012C	7013	7016	7016U	7017E	7019	7019B	7031O
1987-11-04				800					1411
1989-09-04									830
1989-09-07	685			1000					950
1989-09-30									620
1989-12-01									831
1990-01-11				655			785		
1991-01-23			610						
1991-01-24	630		675						
1992-02-19	660								
1992-05-03			650						
1993-02-03	1450	917	1300	1370			960		
1993-05-05				885			903		
1993-10-18				600					
1994-04-21	700			670					
1994-09-28				610			615		732
1995-09-23							653		
1996-08-29	620								
1998-01-26									1543
2000-01-10				660					607
2000-10-22		1050							
2000-10-23			1456						
2001-11-01				850					
2001-11-02									851
2002-04-01							645		
2003-01-12				650			928		
2003-10-16				1220					
2003-11-18		1160	729	810			645		
2004-03-26				830			665		
2004-04-15		615					1030		786
2004-12-03									640
2006-11-03				690					
2006-11-30									923
2007-01-27				800					
2007-10-04									714
2007-10-16							655		
2008-09-24							705		
2008-09-25				780					
2008-10-09		718		895					
2009-01-10				790					
2009-03-30							730		
2009-09-27		992		1100	968				
2009-12-13				750	926				
2010-08-13				750					
2011-03-04									680
2011-11-18				650					881
2012-03-19									617
2012-09-28				610					
2015-09-05		674							762
2015-09-06				940	1646				
2016-12-17		750							744
2016-12-18									1280
20016-12-19						1400			
2017-01-18			600		640	645			
2018-11-18									680
2019-04-19		614	951		1555	964		1008	
2019-09-12		1427	1072		2000			3206	1860
2019-09-13						2040			
2019-12-02								624	880
2020-01-20						645			730
2020-03-23		1029	1177		1200				

Tabla 2. Episodios de lluvias copiosas en el litoral de Cartagena, La Unión, San Javier y San Pedro del Pinatar, periodo 1987-2020. Fuente: elaboración propia con datos AEMET (2020).



Figura 4. Espacios encharcados tras las últimas lluvias. Entorno del Aljibe de Los Aguados (Los Martínez del Puerto). Fuente: Gómez Espín, J. Mª. (25-01-2020).

Fecha	7020	7025	7026	7026X	7031X	7032	7024J	7029	7022
1987-11-03		1260							
1987-11-04					3300	2100		1900	
1989-09-04					600	1023			
1989-09-07				720	640			660	
1989-09-30					1304				
1991-01-23	700	650	640	725	637	852		750	
1992-02-19		675		700	731	671		880	
1993-02-03			1380	1185					
1993-02-04					788			650	
1993-05-05			855						
1994-04-21			660	832					
1994-09-28					730	652			
1996-01-18						917			
1997-09-29	970	800	680	740			1100		
1998-01-26				673		995			
2000-01-10			600		606				
2000-01-11						979			
2000-10-22							615		
2000-10-23	1190	1520	1600	1534			1265		
2001-11-01					1278				
2001-11-02						662			
2003-01-09						600			
2003-10-16			680						
2003-11-18			670	869			798		
2004-04-15	680		720	624	819	991	632	690	
2004-12-04						803			
2006-04-17								710	
2007-01-26							655		680
2009-01-10			642	667					
2009-03-03									672
2009-08-11							1005		
2009-09-15							610		
2009-09-27	740	745	1200	797	643	800	793		1210
2009-09-28			1100	800					790
2010-08-17									635

Fecha	7020	7025	7026	7026X	7031X	7032	7024J	7029	7022
2011-03-04						680			
2011-11-18					1449	1220			
2012-09-28	770			660					982
2014-09-26			855	740					
2015-09-05	700	600		818	842	628	950		
2015-09-27			600						
2016-12-17	620	740		730	778	687	790	720	1000
2016-12-18	600	1120	1560	1401	1633	1587	800	1400	
2016-12-19					1792				
2017-01-18								690	
2017-03-13								600	
2018-11-18		840						740	820
2019-04-19	750	845	825	740	755	610	780	740	793
2019-09-12	1160		2400	2420	2052	2270	1700	1840	876
2019-12-02		850	620	686	1146				
2020-01-20								705	
2020-03-23	600	700		770	660		785		
2020-03-24			1350						

Tabla 3. Episodios de lluvias copiosas en el interior de la cuenca del Campo de Cartagena-Mar Menor, periodo 1987-2020. Fuente: elaboración propia con datos AEMET (2020).

4. DISCUSIÓN

La gestión del agua se enfrenta al reto de escenarios de cambio climático en el que serían más frecuentes sucesos extremos, como sequías e inundaciones, que podrían generar dificultades (fallo de garantía de suministro) para satisfacer la demanda hídrica y alimentaria de una población en crecimiento (Gil-Meseguer et al., 2020: 104).

La DANA de los días 11 al 14 de septiembre de 2019 originó lluvias abundantes que ocasionaron crecidas e inundaciones (roturas de motas y multitud de trenques, cultivos y granjas bajo las aguas, etc.). Agroseguro lo considera “el peor evento de gota fría en la historia de los seguros agrarios” (Diario La Opinión, 04/07/2020).

La localidad de Los Alcázares fue la más afectada en las inundaciones de septiembre de 2019, cuya población tuvo que ser evacuada (La Verdad, 13/09/2019). Toda el área de la comarca del Mar Menor quedó incomunicada por el corte de la autopista AP-7 (La Opinión, 13/09/2019).

Las inundaciones provocadas tuvieron tales efectos en el sector productivo, infraestructuras, viviendas y demás mobiliario que la CARM solicitó la declaración de zona catastrófica (La Opinión, 14/09/2019). En concreto, los daños superaron los 100 millones de euros, el doble de las pérdidas que ocasionaron las inundaciones de 2016 (La Opinión, 17/09/2019) y pidió la activación del fondo de solidaridad de la Unión Europea (La Verdad, 02/10/2019). La Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM) evaluó los daños ocasionados por las intensas lluvias del 11 al 15 de septiembre de 2019 en 96 185 085 €, casi la mitad de ese importe (46,5 %) era de daños en infraestructuras de producción agrícola.

De igual forma, las inundaciones afectaron a la infraestructura de turismo, que sufrió un consecuente declive mediante las cancelaciones de usuarios (La Verdad, 24/09/2019) e incluso un cierre de playas para prevenir posibles infecciones ocasionadas por la mala salubridad de la costa (La Verdad, 28/09/2019). El panorama de colapso motivó que hasta se sucedieran actos de pillaje y robo (La Verdad, 17/09/2019).

Los cambios en los usos del suelo, la falta de ordenación y la ocupación de terrenos inundables ha dejado a la población desvalida ante un fenómeno de lluvia torrencial alimentado por el calentamiento global (Cerdera, 2019: 20).

En el año 2020 la borrasca de nombre Gloria, que atravesó la costa mediterránea de la península entre los días 20 y 24 de enero, provocó graves daños en diferentes producciones (cítricos, hortalizas, estructuras de cultivos bajo cubierta. Además de copiosas lluvias (más de 200 litros/m2), se registraron rachas de viento de más de 130 km/hora, provocando inundaciones en áreas del litoral.



Figura 5. Trenques ocasionados por las lluvias en el Campo de Cartagena- Mar Menor. Fuente: Gómez Espín, J. Mª. (25-01-2020).

Del 11 de septiembre de 2019 al 24 de marzo de 2020 se sucedieron cuatro inundaciones (septiembre, diciembre, enero y marzo) sobre Los Alcázares "llueve sobre mojado". En el IES Antonio Menárguez las aguas turbias subieron por encima de los picaportes de las puertas del Centro (La Verdad, 18/04/2020).



Figura 6. Inundaciones en los campos de Los Alcázares. Fuente: Bernabé-Crespo, M. B. (13/09/2019).

5. CONCLUSIONES

Las lluvias torrenciales y las inundaciones provocadas han tenido especial incidencia en la Región de Murcia y en su litoral, que fue declarado como zona catastrófica (La Verdad, 14/09/2019). En los

últimos cinco años se han sucedido tres eventos de inundaciones de considerable magnitud: en diciembre de 2016, en septiembre de 2019 y en marzo de 2020. En algunos municipios como Los Alcázares, la vulnerabilidad de su población ha motivado a la Administración Regional a plantear medidas que palien esta situación de riesgo. De esta manera se ha preparado un proyecto de un nuevo colector de pluviales, que tiene una longitud de 971 metros y recoge aguas de lluvia del exterior del casco urbano y discurrirá soterrado bajo el resto de calles del pueblo (Diario La Opinión, 27/06/2020). Es necesario reordenar el territorio, delimitar los cauces naturales que deben dar salida a las aguas turbias, y recuperar técnicas y prácticas para su aprovechamiento en regiones semiáidas (Gil-Meseguer, 2014: 39).

Resulta fundamental seguir realizando estudios de inundación que permitan caracterizar la vulnerabilidad de las áreas urbanizadas, y modificar la legislación para prohibir la construcción en estas áreas de riesgo potencial.

REFERENCIAS

- Camarasa-Belmonte, A. M., Rubio Vila, M. & Salas Rey, J. (2020). Evolución de episodios pluviométricos en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (1989-2016). *Investigaciones Geográficas, 73*, 11-29.
- Capel Molina, J. J. (1987). Inundaciones y avenidas en los ríos del Sureste español. *Papeles de Geografía, 13.* 76-86.
- Cerdera, A. F. (2019). Llueve sobre mojado. *Nova Ciencia, 154,* 20-23.
- Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente (2019). *Informe relativo a los daños ocasionados por las intensas lluvias producidas entre los días 11 y 15 de septiembre de 2019.* Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Gil-Guirado, S. & Pérez-Morales, A. (2019). Variabilidad climática y patrones termopluviométricos en Murcia (1863-2017). Técnicas de análisis climático en un contexto de cambio global. *Investigaciones Geográficas, 71, 27-54.*
- Gil-Meseguer; E. (1987). *Los relieves meridionales. Estudio Geográfico de los relieves litorales comprendidos entre la desembocadura del río Almanzora (Almería) y la de la rambla de Las Moreras (Murcia).* Exmo. Ayuntamiento de Águilas y Universidad de Murcia.
- Gil-Meseguer, E. (1988). El papel de las pequeñas áreas vertientes en las inundaciones de la Huerta de Murcia: las ramblas del Garruchal y Los Romos tras las precipitaciones del 4 de noviembre de 1987. *Papeles de Geografía, 14,* 167-183.
- Gil-Meseguer, E. (2014). El agua, un recurso limitado en regiones semiáridas: aprovechamiento y explotación del agua en medios semiáridos. En: J. Mª López Ballesta, *Phicaria, II Encuentros Internaciones del Mediterráneo: Uso y gestión de recursos naturales en medios semiáridos del ámbito mediterráneo*, 39-52. Universidad Popular de Mazarrón.
- Gil-Meseguer, E., Bernabé-Crespo, M. B. y Gómez-Espín, J. Mª (2020). Resiliencia en el consumo de agua por parte de abastecimientos y regadíos ante las sequías en el Sureste de España. *Cuadernos de Geografía, 104,* 107-130.
- Gil Meseguer, E., Pérez Morales, A. & Gómez Espín, J. Mª (2012). Precipitaciones y avenidas del 28 de septiembre de 2012 en el cuadrante suroccidental de la Cuenca del Segura (municipios de Lorca, Puerto Lumbreras y Pulpí). *Papeles de Geografía, 55-56*, 75-94.
- Gómez-Espín, J. Mª. (2004). *Aprovechamiento integral del agua en la Rambla de Nogalte (Puerto Lumbreras-Murcia).* CAM Proyecto Agua, Ayuntamiento de Puerto Lumbreras y Universidad de Murcia, Murcia.
- Lillo Carpio, M. J. (1978/79). Geomorfología litoral del Mar Menor. *Papeles del Departamento de Geografía, 8,* 9-48.
- Morote, A.F. & Hernández, M. (2017). El uso de aguas pluviales en la ciudad de Alicante. De

viejas ideas a nuevos enfoques. *Papeles de Geografía, 63,* 7-25.
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica) y CHS (Confederación hidrográfica del Segura. (2019). *Estudio de precipitaciones brutas registradas en la Cuenca del Segura. (12 de septiembre de 2019-16 de septiembre de 2019, de 08,00 a 08,00).* SAIHSegura, Murcia.
- Prieto, A., Fernández, S. & Sancho (2009). *Atlas de los paisajes de la Región de Murcia.* Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

NOTICIAS DE PRENSA

- Aliaga Sola, I. (2020). ¿Por qué se inundan Los Alcázares?. *Nuevo Colas*, 14, 16-25. https://www.murciaeduca.es/iesantoniomenarguezcosta/sitio/upload/nuevo_colas_14pdf
- La Opinión (13/09/2019). *Gota fría: San Javier se queda incomunicado* https://www.laopiniondemurcia.es/municipios/2019/09/13/gota-fria-san-javier-queda/1051985.html
- La Opinión (14/09/2019). *La COEC pide "especial atención" al Mar Menor en la declaración de zona catastrófica*. https://www.laopiniondemurcia.es/comunidad/2019/09/14/coec-pide-especial-atencion-mar/1052319.html
- La Opinión (17/09/2019). *La DANA provoca daños en Los Alcázares por valor de 100 millones*. https://www.laopiniondemurcia.es/comunidad/2019/09/17/dana-provoca-danos-alcazares-100/1052848.html
- La Verdad (13/09/2019). *El alcalde de Los Alcázares pide ayuda para evacuar a los vecinos*. https://www.laverdad.es/murcia/otros-municipios/alcalde-alcazares-pide-20190913113033-nt.html
- La Verdad (14/09/2019). *La Comunidad pide la declaración de zona catastrófica para toda la Región de Murcia*. https://www.laverdad.es/murcia/sigue-directo-rueda-20190914115206-nt.html
- La Verdad (17/09/2019). *Los comerciantes denuncian que están sufriendo actos de pillaje*. https://www.laverdad.es/murcia/comerciantes-denuncian-sufriendo-20190917013042-ntvo.html
- La Verdad (24/09/2019). *El turismo acusa el golpe de la gota fría*. https://www.laverdad.es/murcia/cancelaciones-dana-ponen-20190924003407-ntvo.html
- La Verdad (28/09/2019). *Cierran preventivamente varias playas del Mar Menor para evitar infecciones*. https://www.laverdad.es/murcia/cartagena/cierran-preventivamente-varias-20190928101722-nt.html
- La Verdad (02/10/2019). *López Miras pide a la UE que active el Fondo de Solidaridad para hacer frente a los «gravísimos daños» por la gota fría*. https://www.laverdad.es/murcia/lopez-miras-pide-20191002143737-nt.html
- La Verdad (18/04/2020). *Fuimos a limpiar el instituto para no perder clases*. https://www.laverdad.es/murcia/limpiar-instituto-perder-20200418001623-ntvo.html

SISTEMA DE ALERTA ANTE INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MURCIA

P. Daniel Martínez Solano
Departamento de Redes, EMUASA, España
pedrodaniel.martinez@emuasa.es

Lorena Martínez Chenoll
Ingeniera de Proyectos, CPS, España
lorenamartinez@cps.es

Dorota Nowicz
Ingeniera de Proyectos, CPS, España
d.nowicz@cps.es

RESUMEN

La adecuada preparación de los servicios públicos y de emergencia permite una gestión eficiente ante sucesos de lluvia intensa, sobre todo durante eventos extraordinarios que puedan afectar a grandes áreas de población. Una red de pluviometría propia puede proporcionar un sistema de alerta basado en la caracterización de la lluvia en tiempo real y su comparación con sucesos anteriores. Para ello, la caracterización de los distintos episodios de lluvia mediante las curvas IDF (Intensidad, Duración, Frecuencia) y las curvas IMM (Intensidad Media Máxima), así como su posterior comparación, podrían llegar a proporcionar un resultado rápido y certero sobre el impacto del suceso de lluvia sobre las condiciones en la vía pública.

1. ANTECEDENTES

1.1. Problemática del drenaje de aguas pluviales en la ciudad de Murcia

La ciudad de Murcia se encuentra en el sureste de la península Ibérica y es la séptima ciudad más poblada de España. Su término municipal es el 16º más extenso del país y cubre 886 km2 (Ayuntamiento de Murcia, 2020).

Murcia presenta un clima en transición entre el clima mediterráneo y el clima semiárido Esto provoca unas precipitaciones anuales bajas (entre 300 y 3500 mm/año), con muy escasas precipitaciones en verano y la aparición del fenómeno de “gota fría” en primavera y otoño.

Se pueden identificar cuatro grandes zonas que recorren de norte a sur el término municipal: serranías del norte del valle; valle central Guadalentín-Segura; sierras de Carrascoy y del sur; y Campo de Murcia. Es en el núcleo central conformado por el valle del Segura y flanqueado por las dos zonas de sierra donde se ubica la ciudad y su área periurbana, concentrando a la mayor parte de la población. Este espacio se extiende en dirección suroeste-noreste con una anchura aproximada de siete kilómetros. (Ayuntamiento de Murcia, 2020).

La existencia de la huerta de Murcia y su explotación desde la época árabe ha conformado el territorio, con la particularidad de que la red tradicional de riego y posterior recogida de aguas "muertas", procedentes del drenaje de los diferentes huertos, se encuentra en muchos puntos de la franja anteriormente citada por debajo del cauce del río Segura. Esto a su vez condiciona la gestión de las aguas de escorrentía por 2 motivos:

1) La red unitaria de saneamiento tiene que conducir tanto las aguas urbanas residuales hacia la depuradora (situada junto al río Segura) como las aguas pluviales recogidas por dicho sistema, en los aliviaderos al río Segura, mediante estaciones de bombeo, con la consiguiente limitación de capacidad de transporte.
2) Las ramblas perimetrales de la ciudad no presentan conexión directa al río Segura, por lo que las aguas de lluvia que se conducen a través de dichas ramblas se estancan en la zona baja de la ciudad, evacuándose a posteriori tanto por la red de saneamiento como por la red de riego, pero causando graves problemas de drenaje.

1.2. La "gota fría" y los sucesos de lluvia intensa en Murcia

Todo el sureste español, en el que se sitúa la ciudad de Murcia, está expuesto a los sucesos de lluvias intensas coloquialmente llamados "gotas frías". En general, la ciudad de Murcia sufre frecuentemente de sucesos de lluvia de cierta intensidad, en los que se pueden llegar a recoger más de 40 l/m^2 en 24 horas.

En los últimos años se ha detectado un incremento del fenómeno meteorológico conocido como "DANA", definida técnicamente como "una depresión cerrada en altura que se ha aislado y separado completamente de la circulación asociada al chorro, y que se mueve independientemente de tal flujo llegando, a veces, a ser estacionaria o, incluso, retrograda (su desplazamiento es, en estos casos, de dirección este-oeste). En general, asociamos el término DANA a sucesos intensos de lluvia que pueden provocar graves inundaciones y en todo caso, afectan a la vía pública (Martín León, 2003).

Según los últimos estudios, este fenómeno se está intensificando para las precipitaciones de otoño, tal y como hemos podido comprobar en los últimos años (Fernández Monistrol 2019).

1.3. El sistema de monitorización de la ciudad de Murcia

La ciudad de Murcia, a través de la Empresa Municipal de Aguas de Murcia (en adelante, Aguas de Murcia) dispone de un sistema de monitorización del sistema de alcantarillado, que permite el seguimiento en tiempo real de los sucesos de lluvia.

Dicho sistema se compone de:

- 19 pluviómetros repartidos por todo el término municipal
- 119 sensores de nivel de la red de colectores, cubriendo todas las cuencas de saneamiento

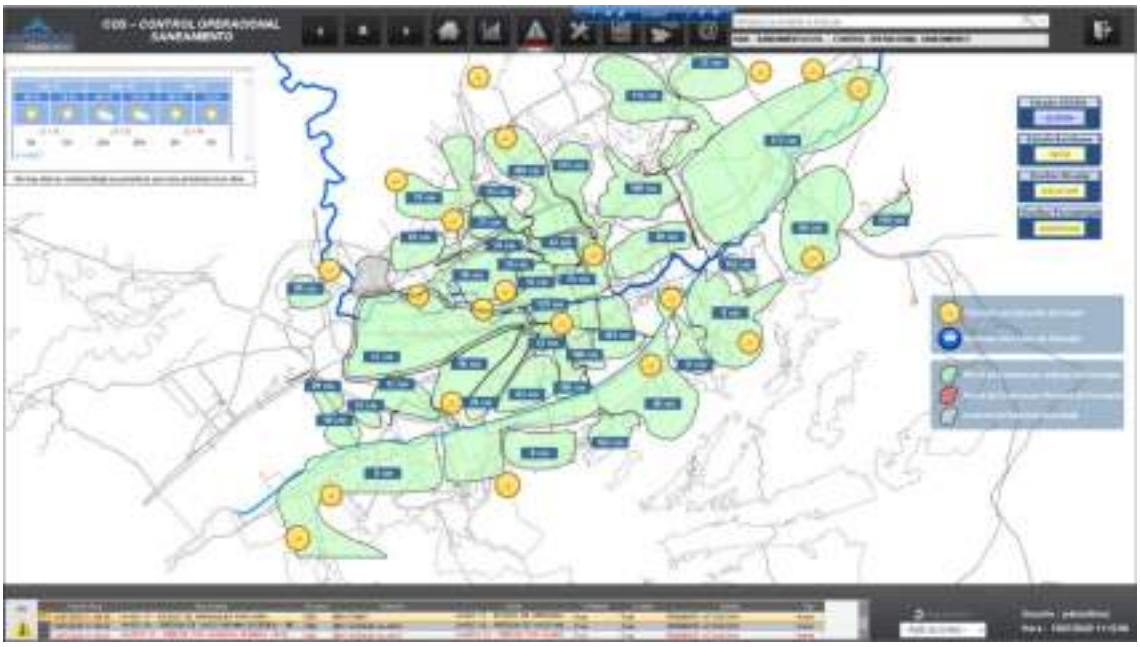


Figura 1. Sistema de monitorización del saneamiento de la ciudad de Murcia.

Este sistema está diseñado para el control de los 1.600 km de red de saneamiento de la ciudad de Murcia. De esta forma, se controla el estado de cada una de las cuencas de saneamiento en las que se divide el sistema, tanto en tiempo seco como frente a sucesos de lluvia, se mide la cantidad de precipitación en cada zona de la ciudad y, adicionalmente, permite la modelización hidráulica del saneamiento, con un grado de precisión notable.

La frecuencia con la que se actualizan los datos de los diferentes sensores es de menos de 2 minutos, por lo que constituye una oportunidad para establecer un *sistema de alerta temprana ante avenidas*, que posibilite:

1. La optimización de los equipos de mantenimiento en campo ante sucesos de lluvia que van a producir diversas incidencias (reboses, atranques de imbornales, atranques en bombeos de agua residual).
2. La optimización de la operación en los actuadores de saneamiento existentes en la red (compuertas, bombas de agua residual y pluvial).
3. El aviso a Protección Civil y Policía Local en aquellas vías urbanas que potencialmente pudieran llegar a sufrir afección derivada del suceso de lluvia.

2. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE AVENIDAS EN LA CIUDAD DE MURCIA

Para el desarrollo de un sistema de alerta temprana, debemos resolver 3 cuestiones:

1. ¿Cómo se van a caracterizar las precipitaciones medidas?
2. ¿Cuándo se van a comparar dichas precipitaciones?
3. ¿Cómo se van a generar las alertas?

A continuación, se va a describir cómo se han resuelto estas cuestiones en el *sistema de alerta temprana ante avenidas* de Aguas de Murcia.

2.1. Caracterización de los sucesos de lluvia

Existen muchos métodos para la categorización y ordenación de los sucesos de lluvia. El método más sencillo es el empleado por la Agencia Estatal de Meteorología, clasificando los distintos sucesos según la intensidad media en 1 hora.

Este sistema, que a priori puede valer para establecer la importancia del suceso, no es tan válido para evaluar su impacto, dado que, dependiendo del sistema de drenaje y evacuación de aguas pluviales, no tendrá el mismo comportamiento un suceso de lluvia con intensidad media de 40 l/m^2 si dichos 40 l/m^2 se reparten homogéneamente a lo largo de los 60 minutos o bien se concentran en 10 minutos de lluvia muy intensa.

La caracterización de la lluvia es compleja, pero como primera aproximación se opta por emplear curvas conocidas, cuya validación se realizará durante el periodo de prueba del sistema. Así pues, se ha optado por categorizar los sucesos de lluvia (más o menos intensa) mediante 2 clases de curvas:

1. Curva de Intensidad Media Máxima (IMM), donde ordenamos de mayor a menor intensidad media máxima los diferentes intervalos del suceso de lluvia (1 minuto, 5 minutos, 1 hora, etc.).
2. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), en la que se incorpora el concepto de periodo de retorno.

Ambas curvas permiten representar los diferentes sucesos de lluvia que podemos medir mediante coeficientes adimensionales. De esta forma, se puede construir una clasificación independientemente de la intensidad o duración de la lluvia.

En general, las expresiones para las 2 curvas utilizadas son las siguientes:

$$I = I_{M0}\left(\frac{t_0}{t}\right)^N \quad (1)$$

$$I = \frac{KT^m}{D^n} \quad (2)$$

Donde Im0, N, K, T, m, y n son coeficientes que van a caracterizar los distintos sucesos de lluvia (Moncho, 2008).

Por tanto, con las expresiones anteriormente mostradas se caracterizarán los diferentes sucesos de lluvia medidos.

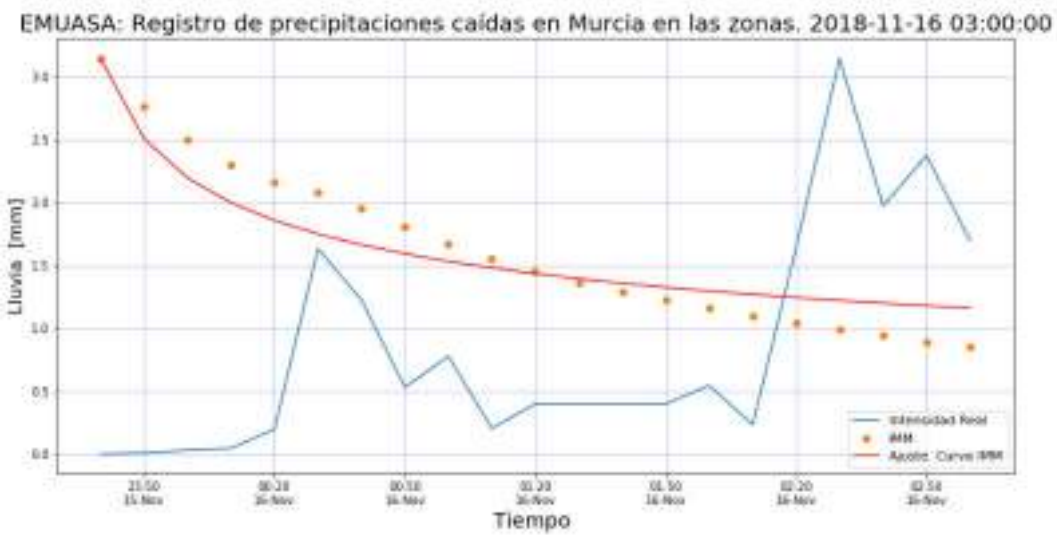


Figura 2. Ejemplo de generación de curva IMM.

2.2. Esquema funcional del Sistema de alerta temprana ante avenidas

Según lo anterior, a medida que se inicia el suceso de lluvia, mediante las anteriores expresiones (1) y (2) se puede caracterizar la precipitación caída. A partir de esta aproximación, se ha diseñado el *sistema de alerta temprana ante avenidas*, con la siguiente estructura funcional:

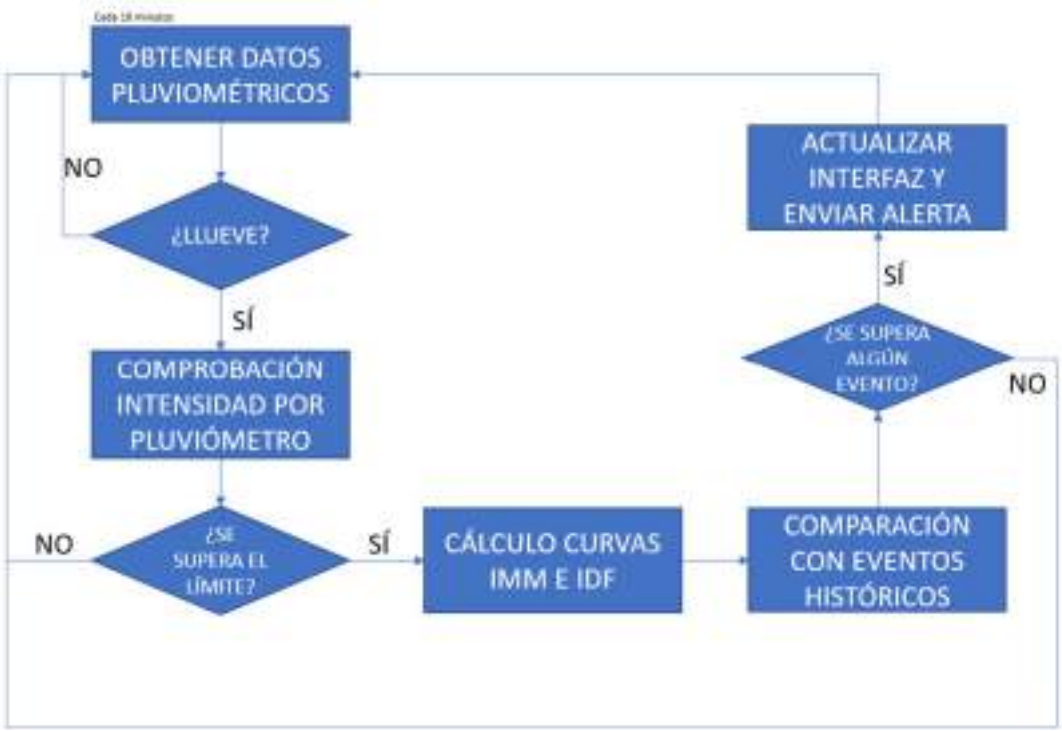


Figura 3. Diagrama funcional de la aplicación.

El procedimiento se puede resumir en:

2.2.1. Obtención de datos pluviométricos y comprobación de los umbrales de intensidad

El primer paso de la aplicación es recoger los datos de lluvia medidos por los pluviómetros de la red de Aguas de Murcia. A partir de dichos datos, se calcula para cada uno de los pluviómetros la intensidad media de lluvia para 10 minutos, 1, 3 y 12 horas, y se realiza un primer filtro de los datos

medidos, descartando aquellas intensidades superiores a los "récords" de lluvias por intervalo registrados por AEMET, (AEMET, 2017)

Una vez calculadas las intensidades medias por intervalo, se realiza comparación con los valores de alerta definidos, basados en los valores de alerta propuestos por AEMET, pero que pueden ser modificados por el usuario (Figura 4). Si se superan estos umbrales, el Sistema de alerta proporcionará alerta codificadas por colores según la anterior tabla. Además, al superar dichos umbrales se inicia el cálculo de las curvas de caracterización del suceso y su comprobación con eventos históricos.



Figura 4. Umbrales de precipitación por intervalos

2.2.2. Cálculo de curvas características y comparación con eventos históricos

En esta segunda fase se inicia el cálculo de los hietogramas por cuencas de saneamiento. Para ello, se ha dividido el término municipal en una serie de cuencas de saneamiento en la aplicación, de tal forma que para cada una de ellas se calcula un hietograma ponderado a partir de los datos de los pluviómetros existentes, con un intervalo de cálculo de 10 minutos.



Figura 5. Cuencas de saneamiento y pluviómetros (en verde) en el sistema.

A partir de los hietogramas, se realiza ya el cálculo de los coeficientes que generan las curvas IMM e IDF, para cada una de las cuencas de saneamiento, así como la comparación con eventos históricos almacenados en la aplicación:



Figura 6. Ejemplo de generación y comparación de curvas.

Para cada evento de lluvia almacenado en la aplicación se generan los coeficientes de las curvas IMM e IDF, y la definición geográfica del listado de calles que sufrieron afección por el evento de lluvia:

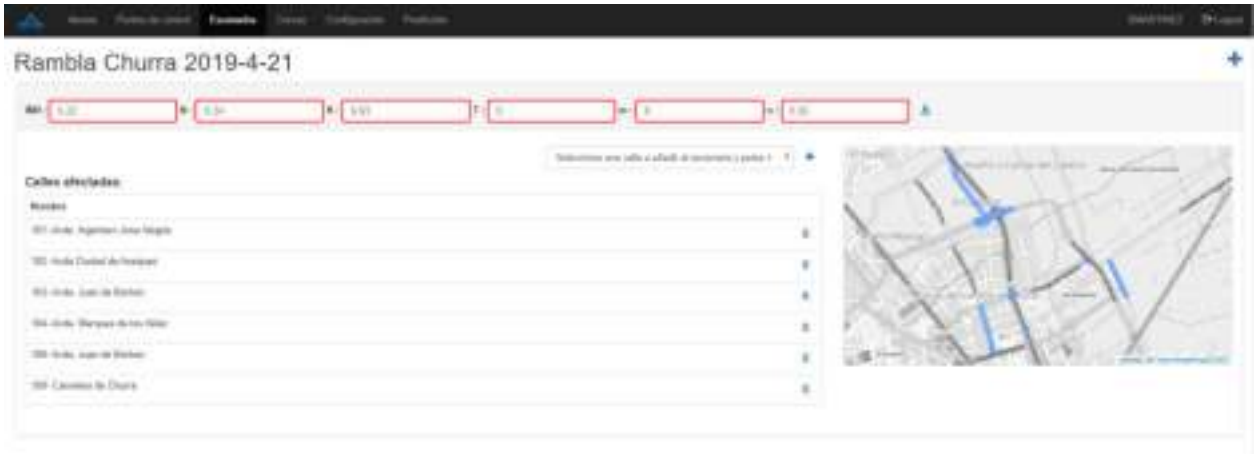


Figura 7. Ejemplo de evento histórico almacenado.

2.2.3. Generación de alertas y actualización de la interfaz

En el caso de que las curvas características calculadas en tiempo real superen alguna curva histórica, se generarán los siguientes avisos:

- Precipitación en cada pluviómetro de la red.
- Listado de las posibles calles afectadas por cuencas de saneamiento.

Para ello, previamente se ha definido para cada evento histórico las calles afectadas, a partir de los registros de incidencias de Aguas de Murcia y la información de afección a vía pública recogida por los servicios de Protección Civil y Policía Local de Murcia.



Estimado/a P. Daniel Martinez Solano,

El SAT ha detectado posibilidad de afección en las siguientes calles por similitud de los eventos históricos:

Nº	Zona	Lluvia acu. 10min	Lluvia acu. 1h	Lluvia acu. 24h	Tendencia	Vías afectadas
1	San Jose de la vega	3.6	3.6	3.6	Creciente	174- Carretera Tiruna
2	Benajan	7.8	7.8	7.8	Creciente	Camino San Jose, Avda. de la Libertad, 162, Subterraneo Fabian Escribano

Precipitaciones registradas en los pluviómetros :

Nº	Código	Pluviómetro	Lluvia acu. 10min	Lluvia acu. 1h	Lluvia acu. 12h	Lluvia acu. 24h	Alerta 10min	Alerta 1h	Alerta 12h
1	10184	NUEVA CONDOMINA	0	0	0	0	0	0	0
2	10007	HAVAU NUEVO	0	0	0	0	0	0	0
3	10506	ESPINARDO	0	0	0	0	0	0	0
4	10006	EPO-CHURRA	0	0	0	0	0	0	0
5	10010	DEPOSITO TORREAGUERA	0	0	0	1	0	0	0
6	10002	BARRIOMAR	0	0	0	0	0	0	0
7	10529	SANJONERA LA VERDE	0	0	0	0	0	0	0
8	10009	BENIAJAN 51	15	15	15	15	2	1	0
9	10174	GUARDAMAR	0	0	0	0	0	0	0
10	10003	NUEVA CASATILLAS	0	0	0	0	0	0	0
11	10018	EL PALMAR-RODEON	0	0	0	0	0	0	0

Figura 8. Ejemplo de aviso emitido por el sistema (correo electrónico).

2.3. Limitaciones y fiabilidad

2.3.1. Limitaciones

- No se mide la magnitud de la inundación en cada calle, solo se indica si con un evento similar fue necesario proceder a su corte o no. Al no poder evaluar la magnitud ni de forma cuantitativa ni cualitativa no se pueden establecer niveles de emergencia en base a la magnitud de la inundación.
- En cada zona, para los nuevos eventos cuyos efectos impliquen la inundación de más calles que las registradas en el evento de peores efectos ya registrado en dicha zona, el Sistema de Alerta no detectará la necesidad de cortar las nuevas calles inundadas.
- Las curvas base están basadas en lo pluviómetros existentes en la zona analizada.
- La validez del planteamiento sirve para las cuencas en su estado actual. Grandes cambios en la realidad física del municipio invalidan la relación causa-efecto.
- El sistema requiere de la instalación y mantenimiento de pluviómetros en la periferia del municipio, donde se encuentran las ramblas que generan mayores problemas de afección a vía pública. De esta forma, el sistema puede adelantar la respuesta a eventos de lluvia con la suficiente antelación para poder acordonar las zonas afectadas.

2.3.2. Fiabilidad

A diferencia de otros sistemas basados en la imagen del radar meteorológico, este sistema basa su funcionamiento en los datos reales medidos por pluviómetros de la red de Aguas de Murcia, por lo que no se producen los problemas de ausencia de imágenes en sucesos de lluvia. Adicionalmente, al disponer de una red de pluviómetros extensa, la redundancia está garantizada, por lo que el fallo de uno de los sensores será compensado por el funcionamiento del resto. Por otro lado, al no depender de la modelización hidráulica del fenómeno lluvia-escorrentía, sino que se basa en el concepto "misma lluvia – mismos efectos", el mínimo tiempo de cálculo y la robustez del mismo está asegurado.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Caracterización de las cuencas de la ciudad de Murcia

Al realizar la implantación de este sistema de alerta temprana ante avenidas, se han caracterizado las diferentes cuencas de saneamiento de la ciudad de Murcia, resultando un "mapeo" de las condiciones

que provocan afección a la ciudad. Por ejemplo, en la Figura 9 se muestran las curvas IDF correspondientes a la cuenca de saneamiento *Rambla de Churra:*

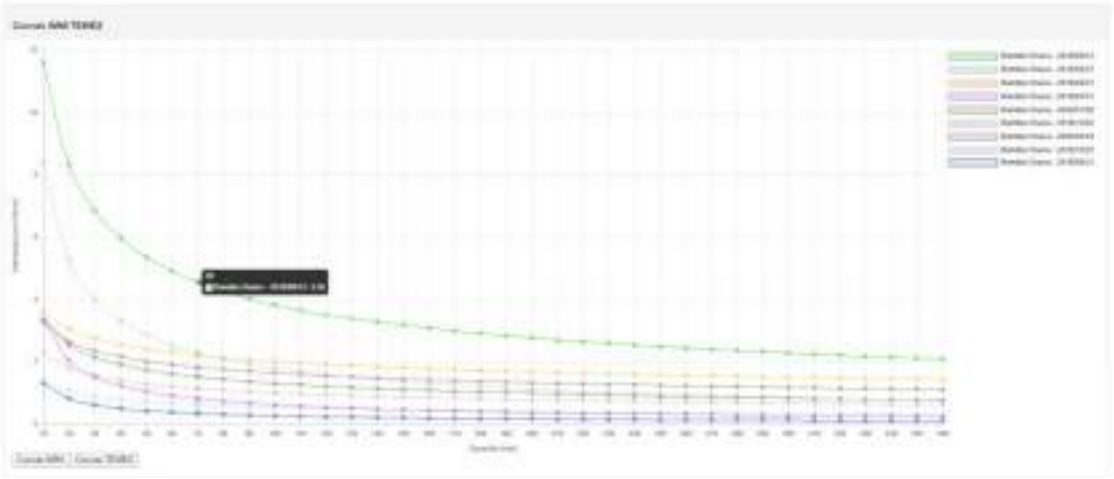


Figura 9. Curvas IDF para diversos eventos históricos en la cuenca *Rambla Churra*

Si bien destaca sobremanera el suceso de lluvia del pasado 12 de septiembre de 2019, la caracterización y después comprobación de las alertas obtenidas para sucesos posteriores de menor intensidad muestran que lluvias de perfil mucho más bajo causan igualmente afección a la vía pública.

De esta forma, lluvias que a priori no generan alertas meteorológicas según los umbrales de AEMET pueden provocar igualmente problemas en la ciudad, y es ante este tipo de lluvias donde el sistema de alerta muestra su potencial, dado que el sistema sí va a ofrecer avisos al desarrollarse el evento de lluvia.

3.2. Futuros desarrollos

- Actualmente el Sistema de Alerta Temprana dispone de un módulo de *Predicción*, basado en los datos de predicción por horas que proporciona AEMET para cada estación meteorológica. El SAT es reciente y está siendo alimentado con curvas históricas y con los eventos actuales. En el futuro se incorporarán diversas fuentes de predicción, como pueden ser otros servicios meteorológicos web o hietogramas obtenidos a partir de la imagen del radar meteorológico.
- También se va a evaluar la utilización de técnicas de *machine learning* para realizar la comparación de los datos de lluvia en tiempo real con los eventos históricos almacenados, en sustitución de las curvas IDF e IMM.

REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Murcia (2020). http://murciaencifras.es
- Región de Murcia Digital (2020). http://regmurcia.com
- Martín León, F. (2003). *Las gotas frías / DANAS. Ideas y conceptos básicos*. http://aemet.es/divulgacion/estudios
- Fernández Monistrol, J. A. (2019). Las depresiones aisladas en niveles altos (DANA): su naturaleza y sus efectos. *Revista Consorseguros*, 11.
- Moncho Agud, Roberto (2008). Análisis de la intensidad de precipitación: Método de la intensidad contigua. *Revista del Aficionado a la Meteorología/eltiempo.com*
- Agencia Estatal de Meteorología, AEMET (2017). https://aemetblog.es/2017/07/20/cual-es-el-record-de-lluvias-en-espana/

CONFLICTOS ENTRE DESARROLLO URBANO E INUNDABILIDAD EN LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA

Alejandro L. Grindlay Moreno
Dr. ICCP, Profesor del Dpto. de Urbanística y O.T., Universidad de Granada, España
grindlay@ugr.es
https://orcid.org/0000-0001-5176-0550

F. Emilio Molero Melgarejo
Dr. ICCP, Profesor del Dpto. de Urbanística y O.T., Universidad de Granada, España
emiliomolero@ugr.es
https://orcid.org/0000-0003-3573-885X

Jorge Hernández Marín
ICCP, GIS4Tech, S.L.
info@gis4tech.com

RESUMEN

El desarrollo urbanístico en las últimas décadas del pasado siglo y en las primeras del presente ha ignorado en múltiples ocasiones al medio hídrico; y no tanto respecto los principales cauces, sino más bien los de un orden menor, como torrentes y barrancos que apenas llevan caudal salvo en episodios de grandes precipitaciones, con tratamientos muy inapropiados y que han generado graves problemas de avenidas e inundaciones. Muchas de dichas afecciones persisten a pesar de que la conciencia medioambiental y las normativas han progresado mucho, y aunque están identificadas y en proceso de restitución, aún queda mucho por hacer. En la presente comunicación se presentan los conflictos verificados entre dicho desarrollo urbano y la inundabilidad propia de los cauces del sur peninsular en la Aglomeración Urbana de Granada (AUGr). Esta ha experimentado un acelerado proceso transformación que ha agravado sus tradicionales riesgos de inundación. Se particulariza finalmente en algunas poblaciones, como la capital, y se indican algunas de las soluciones estudiadas que, entre otras, pasan por recuperar de alguna manera la continuidad de los cauces, así como complementarlas con intervenciones de drenaje urbano sostenible.

1. INTRODUCCIÓN

Parte del desarrollo urbanístico en las últimas décadas del pasado siglo y en las primeras del presente ha tenido lugar ignorando al medioambiente en general y al medio hídrico en particular. Esto ha sido particularmente grave en los entornos metropolitanos, donde se han verificado crecimientos urbanos muy acelerados que han ocupado impropiamente superficies próximas a cauces y afectas por distintos grados de riesgo de inundación. Además, el tratamiento dado a los cauces menores tributarios ha sido, en la mayoría de los casos, el de su desvío o entubamiento, a veces con secciones insuficientes para evacuar los caudales de amplios periodos de retorno.

Ello se va a verificar en la Aglomeración Urbana de Granada (AUGr), y así la presente comunicación tiene como objetivo presentar este conflicto entre desarrollo urbano e inundabilidad en dicho entorno metropolitano.

De hecho, en general, las graves afecciones de las inundaciones en áreas urbanas ponen de manifiesto la deficiente ordenación territorial y urbanística vinculadas particularmente a los espacios fluviales, habiéndose generado además evidentes riesgos para la población que habita en tales ámbitos (González, 2017).

A pesar de que una de las cuestiones hidrológicas tradicionales en relación con la planificación espacial ha sido claramente la gestión de las inundaciones, ello ha sido tratado, cuando se ha considerado, produciendo una separación mínima a través de obras hidráulicas como los encauzamientos, y apenas se consideró lo que ahora es conveniente de "dar el espacio al río", pasándose de una aproximación meramente defensiva a otra más integradora (Grindlay, 2012). Por lo que, a veces por ignorancia o por falta de normativa a tener en cuenta, el planeamiento y el desarrollo urbanísticos no se han aproximado ni tratado adecuadamente a los entornos hídricos. De hecho, en Andalucía no fue hasta 2009 en que la Agencia Andaluza del Agua de la Consejería de Medioambiente estableció unas *Recomendaciones sobre el contenido mínimo de los instrumentos de planeamiento urbanístico en materia de aguas*, tratando, entre otros, sobre el Dominio Público Hidráulico y la prevención de riesgos por avenidas e inundaciones (CMA, 2009), con algunas indicaciones sobre su integración, pero que tardarían en adoptarse de forma generalizada.

2. INUNDACIONES EN LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA

La AUGr se encuentra en la cuenca del Guadalquivir surcada por uno de sus principales afluentes, el río Genil que, a su vez, se encuentra alimentado por la serie de cauces que la irrigan procedentes igualmente de Sierra Nevada y sus estribaciones, como los ríos Darro, Beiro, Monachil y Dílar, así como toda la red hídrica que drena el área. Según Garrido y Sánchez (2019), "es un ámbito tradicionalmente identificado con la comarca de la Vega de Granada, en el que sus principales características son la presencia de la histórica ciudad de Granada y la configuración de un espacio agrario de gran singularidad, ámbito al que se adscriben numerosas poblaciones menores con las que mantienen distintas relaciones funcionales".

Esta es, al igual que el resto de la región andaluza, una de las áreas más castigadas por el impacto de las inundaciones, debido principalmente a su régimen de precipitaciones extremas muy elevadas, unido a un territorio abrupto y deforestado, y a la alta concentración de la población y la actividad económica en torno a dichos cauces. Esto se ha mostrado en los numerosos episodios acaecidos a lo largo de la historia que, no obstante, se han visto aminorados en las últimas décadas por la profunda regulación de la cuenca (con la presa de Canales sobre el Genil en 1988) y por las infraestructuras de defensa acometidas (como el encauzamiento del Genil en los noventa), entre otras (Consejería de Obras Públicas y Transportes, 2002; Grindlay y Matarán, 2011).

Efectivamente, el área de la Vega de Granada, entre la cabecera del Genil y la ciudad de Loja (cola del embalse de Iznájar), se va a significar tradicionalmente respecto de las inundaciones, como señalaba Vallejo (2000), como "uno de los ámbitos más problemáticos de toda la cuenca". Así este ámbito de la Vega, incluyendo a la propia ciudad, "ha sufrido históricamente serios episodios de inundaciones", que "han respondido a la situación deprimida que ocupa el área, rodeada por un impresionante conjunto de relieves desde los que desciende una densa red de cursos de montaña". Tales cursos podrían "canalizar unos importantísimos caudales, que se derivarían de intensas lluvias torrenciales o, en su máxima expresión, de la suma de los aportes de dichas lluvias con los procedentes de los efectos del deshielo". Considerando los resultados de los estudios conjuntos de la Comisión Nacional de Protección Civil y del Ministerio de Obras Públicas de principios de los ochenta, Vallejo (2000) registra en esta área "19 zonas de riesgo, 4 de las cuales son de tipo medio y 2 catalogadas como de riesgo alto que son las únicas de este tipo en toda la cuenca".

El crecimiento demográfico y la ocupación progresiva del espacio de forma anárquica suponen graves problemas en la urbanización de las ciudades andaluzas, y particularmente en Granada y su entorno, a partir de la década de los años cuarenta. El planeamiento local se institucionaliza con la legislación del suelo a mediados de los cincuenta, y los primeros planes generales, y el Plan Comarcal de 1973, poco o nada tuvieron en cuenta sus espacios fluviales. Esto cambiará con el plan general de la capital de 1985, que estableció como objetivo prioritario la recuperación del carácter y los valores ambientales de los cursos fluviales urbanos, principalmente el río Genil, y su vinculación a los espacios libres, y su adecuación paisajística se intensificará con el PGOU de 2011 (Grindlay y Matarán, 2011; González, 2017). No obstante, las poblaciones de la aglomeración urbana apenas contarán con planeamiento general o sus instrumentos urbanísticos no atenderán a los cauces menores que, con frecuencia serán objeto de tratamientos inadecuados.

Dadas las particularidades y tensiones urbanísticas existentes en el ámbito, y la necesidad de coordinación intermunicipal para su ordenación territorial (OT), es por lo que éste será precisamente objeto del primer plan de OT de ámbito subregional aprobado en Andalucía, en virtud de la Ley 1/1994 de Ordenación del Territorio, el *Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana* (POTAUG), que se convertirá así en referente del sistema de planificación territorial en la región (COPT, 1999; Garrido y Sánchez, 2019).

La delimitación del ámbito fue objeto de diversas consideraciones, en cuanto a la integración funcional de los distintos municipios con respecto a la ciudad central y diversos planeamientos anteriores, como el Comarcal del 73, estableciéndose finalmente un total de 32 municipios dentro del Plan (Albolote, Alfacar, Alhendin, Armilla, Atarfe, Cajar, Cenes de la Vega, Cijuela, Cullar-Vega, Chauchina, Churriana de la Vega, Dilar, Fuente Vaqueros, Gojar, Granada, Guevejar, Huertor-Vega, Jun, Lachar, Macarena, Monachil, Ogijares, Otura, Peligros, Pinos-Genil, Pinos-Puente, Pulianas, Santa Fe, Viznar, La Zubia, Las Gabias y Vegas del Genil) (COPT, 1999). Este ámbito se extenderá posteriormente, al menos funcionalmente, al considerar la dimensión de la movilidad metropolitana, altamente motorizada, con la constitución del Consorcio de Transporte Metropolitano del área de Granada en 2003, conformado por 54 municipios (Lizárraga y Grindlay, 2012).

En la memoria-diagnóstico del POTAUG se constató el extraordinario crecimiento urbanístico de la corona metropolitana en las tres últimas décadas del pasado siglo, frente al estancamiento de la ciudad central, en un acelerado proceso de transformación. Además se reconocía que “la disposición espacial del crecimiento” suponía “el mayor problema a escala municipal”, con “nuevos núcleos de población aislados”, “urbanizaciones próximas o colindantes a los núcleos principales”, y “edificaciones discontinuas, con formas de crecimiento urbano” que no mejoraban la estructura urbana sino que solo utilizaba la existente, así como “conurbaciones entre núcleos de distintos municipios, conformando continuos urbanos” que no llegaban a interrelacionarse para constituir un conjunto urbano superior (COPT, 1999).

Aunque la inundabilidad no se va a destacar como un problema grave, sí se van a considerar ampliamente los espacios fluviales en cuanto a sus propuestas. Así se van a proteger con distintas medidas, “bien como ámbitos sometidos a restricción de usos, promoviendo el deslinde del dominio público o incluyéndolos en las zonas de protección territorial o en la red de espacios libres y de uso público”, e igualmente se contemplaban actuaciones de restauración y/o conservación de espacios fluviales, así como la mejora de las condiciones hidráulicas mediante alternativas ‘blandas’. Además, se proponían “medidas de conservación de los componentes naturales y los bordes mediante criterios ambientales y de integración paisajística para nuevos crecimientos, así como la integración de los corredores fluviales en la trama urbana”, incluyéndolos “como componentes principales del sistema de espacios públicos” y “la creación de nuevos parques ligados a la red hídrica”, junto con “la prohibición de nuevas edificaciones, construcciones e instalaciones en el dominio público

hidráulico". Finalmente se recogían "medidas para evitar o disminuir riesgos de inundación y/o avenida relacionadas generalmente con la delimitación de zonas inundables, estudios de inundabilidad, la regulación de usos del suelo en función del riesgo asignado a cada zona y la adecuada capacidad de evacuación de las avenidas que atraviesen los núcleos de población" (COPT, 1999; González, 2017).

Particularmente el POTAUG recogía un presupuesto para la "Protección y regeneración de cauces" pero no para la "mitigación de riesgos hídricos", con lo que quedarán sin efecto tales propuestas. De hecho, como señalan Garrido y Sánchez (2019) haciendo balance del mismo, las actuaciones correspondientes a "los objetivos de mejora y regeneración ambiental y paisajística" apenas se han cumplido en un 25 %, y sus actuaciones "vinculadas con actuaciones infraestructurales, como la prevención de riesgos naturales o urbanísticos, o como la constitución del Sistema de Espacios Libres de la Aglomeración" no llegan al 40 % en su ejecución (Figura 1).

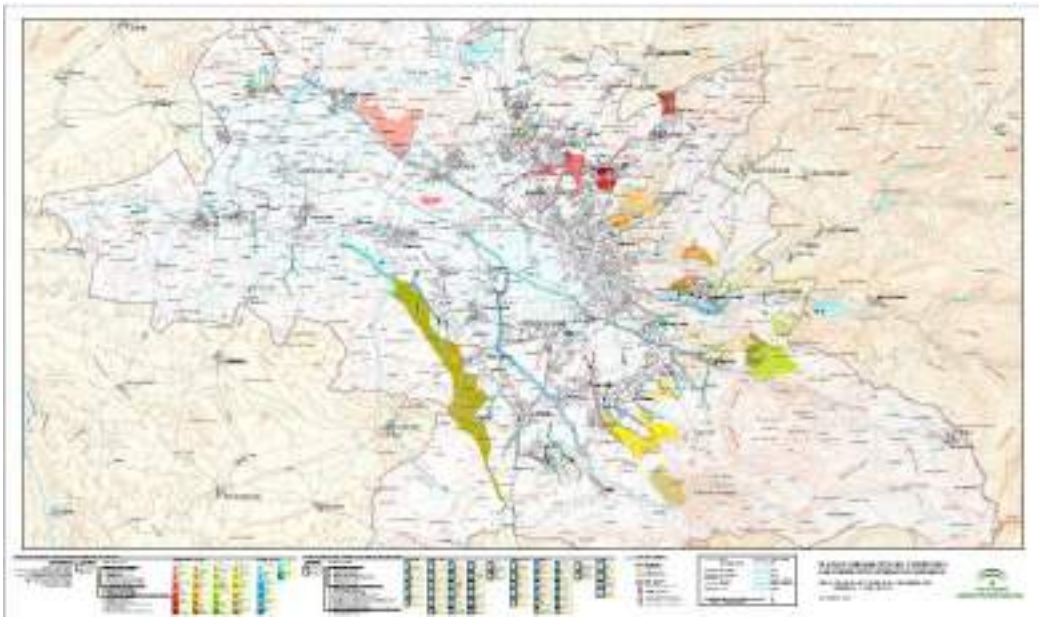


Figura 1. POTAUG. Ord. 5 zonas objeto de mejora y de regeneración ambiental y paisajística. Fuente: COPT, 1999.

3. HACIA LA PREVENCIÓN DE AVENIDAS E INUDACIONES EN LA AUGR

El primer documento redactado en Andalucía para afrontar tal problemática fue el *Plan de Prevención de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces* (COPT, 2002), desarrollado a partir de estudios desde mediados de los noventa, con el objetivo de establecer las medidas necesarias para evitar o minimizar las inundaciones en los núcleos urbanos. Este plan constituyó un primer marco general de intervención en la comunidad autónoma en materia de prevención de avenidas e inundaciones, catalogando 1.099 puntos de riesgo urbano, en 428 municipios, clasificados de mayor a menor gravedad en A, B, C y D, de los que en la AU de Granada se identificaron 72 puntos, 15 de tipo A, 16 de tipo B, 26 de tipo C y 15 de tipo D. Así se denotaban una serie de arroyos, ramblas y barrancos, indicando si las causas determinantes de inundación identificadas eran la ocupación del cauce, la insuficiencia de su sección o de las obras de drenaje o la falta o deterioro de obras de defensa.

De los municipios señalados en el Plan cabe destacar, además de los de Granada, Monachil y Pinos-Puente con 7 cauces (4C y 3D), (1A, 3B, 2C, 1D) y (3A, 2B, 2C) respectivamente, los de Albolote,

Alhendín, Cenes de la Vega, Peligros -haciendo honor a su nombre- y La Zubia con cuatro cauces (3B, 1D), (1B, 2C, 1D), (3C 1B), (2A, 1B, 1D), y (1A, 2B, 1C) respectivamente, y finalmente Maracena con tres cauces tipo A (el barranco Vallejo-las Vegas, acequia del Jaque, y arroyo El Barranquillo), Armilla con un cauce A el Barranco Hondo (Ogíjares), y el municipio de Atarfe con el Barranco del Pozo, que será objeto de un análisis más detallado más adelante (Figura 2).

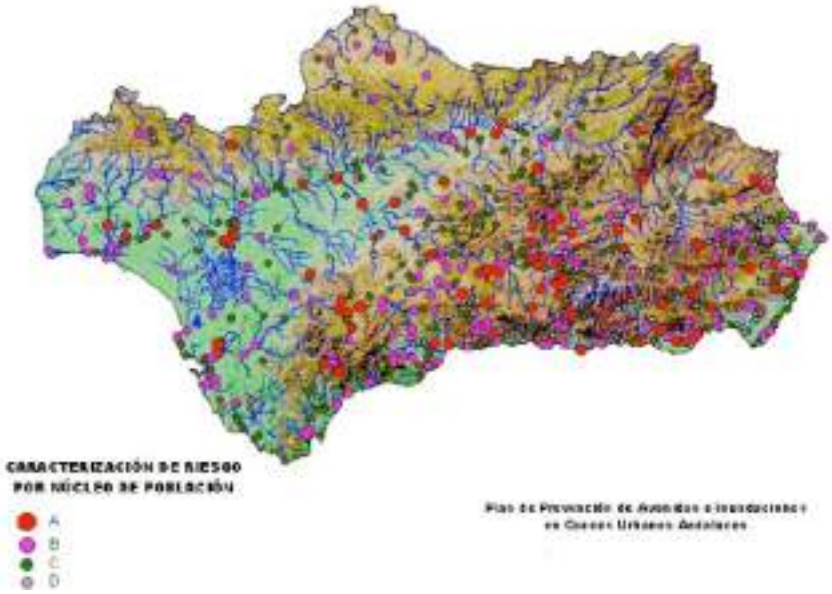


Figura 2. Plan de Prevención de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces. Fuente: COPT, 2002.

Este Plan trataba de afrontar las dificultades de la coordinación interadministrativa, como elemento esencial para su desarrollo, ante la complejidad e interacción de los títulos competenciales de las administraciones estatal, autonómica y local en materia de defensas e inundaciones, para lo cual preveía el establecimiento de convenios de colaboración entre las distintas administraciones públicas. Además, preveía la creación de una comisión de seguimiento de carácter interadministrativo cuyas principales funciones eran la coordinación de las actuaciones previstas en el Plan con cada administración y su seguimiento. Aunque, así mismo, destacaba "como propuesta su intervención a través del planeamiento urbanístico para aumentar la adaptación de los asentamientos a los cursos fluviales, evitando la ocupación de los cauces y limitando los usos en las zonas inundables" aunque, como reconoce González (2017), solo destinó "un 6 % de la inversión a la ordenación territorial y urbanística y a la delimitación de las zonas inundables" y, por contra, "el 89 % de la inversión prevista" fue "para la realización de infraestructuras y actuaciones sobre los cauces" que redujeran "la magnitud de las avenidas en zonas urbanas y sobre las cuencas vertientes a través de medidas de corrección hidrológico-forestal".

El avance definitivo en esta cuestión vendrá con la implantación de la *Directiva Europea 2007/60, sobre la evaluación y gestión de las inundaciones* a través del *Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación*.

Esta Directiva estableció la gestión de los riesgos de inundación a través de ciclos de planificación de 6 años de duración y mediante diversos documentos: la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI), los Mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación (MAPRI) y los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) y se ha centrado fundamentalmente en las zonas con mayor riesgo de inundación, llamadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI).

La información contenida en el anterior Plan fue tenida en cuenta, junto con la cartografía disponible, el análisis de la red hidrográfica, de las características geomorfológicas, los usos del suelo, o el análisis de los registros de inundaciones históricas en la preparación de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) y en la identificación de las áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI), para las que se han elaborado los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación, y así como las principales medidas del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación aprobado en 2016 en cumplimiento de la Directiva.

No obstante, al enfoque tradicional para afrontar este riesgo planteando soluciones estructurales (presas, encauzamientos, etc.), actuaciones que, en muchos casos, se han mostrado insuficientes, en la actualidad se ha mostrado conveniente prevenirlo con medidas fundamentalmente de gestión del riesgo y de ordenación del territorio. Las ARPSI correspondientes a las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir se aprobaron a finales de 2013, con un retraso próximo a los dos años, y actualmente están en revisión (Figura 3). En una primera fase se estudiaron unos 46.000 km de cauces para establecer una selección de aquellos tramos con riesgo de inundación significativo, con una longitud total de 1.948 km, de los cuales 264 corresponden a la provincia de Granada. En dichos estudios se ha observado que las grandes infraestructuras de regulación y de protección, defensa y encauzamiento, han desplazado la problemática de las inundaciones desde los grandes cauces y las ciudades, a sus tributarios y a las poblaciones pequeñas y medianas, con riesgos locales por la ocupación de las zonas inundables (Figueroa, 2011; CHG, 2016; González, 2017). En este sentido, el nuevo Plan de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), recoge medidas de "prevención, protección, preparación y recuperación y lecciones aprendidas" (CHG, 2018).



Figura 3. Áreas de Riesgo Potencial Significativo (ARPSI) cuenca del Guadalquivir. Fuente: CHG, 2018.

4. DESARROLLO URBANO E INUNDABILIDAD EN LA AUGR

Todo este proceso de planificación para la gestión del riesgo de inundación ha puesto de manifiesto numerosas situaciones de riesgo provocadas por un inadecuado uso del territorio, lo que ha sido objeto de preocupación social, dado que en la provincia granadina se identificaban 99 puntos con riesgo alto o muy alto de sufrir riadas y se estimaba que un 14,5 % de la población residía en zonas potencialmente inundables (Asensio, 2010). Naturalmente, dado su mayor nivel de desarrollo urbanístico, el 'cinturón' metropolitano va a aparecer como "la zona con más posibilidades de sufrir inundaciones de toda la provincia", señalándose que "los ríos Genil, Dílar y Cubillas son los que tienen asociado un mayor número de catástrofes a causa de desbordamientos", con 17 de las 33 ARPSI de la provincia, y que "la Vega es la que cuenta con una mayor longitud en riesgo de inundación, con 27 kilómetros" (Asensio, 2018).

Efectivamente, la AUGr será una de las zonas más sensibles con una serie de municipios conteniendo una relevante longitud de cauces en riesgo. Además del municipio de la capital, con 12,1 kilómetros de cauces identificados como en riesgo potencial de inundación, destacan los de Maracena (3,5 km), Peligros (11,6 km), La Zubia (9,2 km), Chauchina y Santa Fe (5,5), y Valderrubio (2,2). Para la valoración de los daños se analizaron las zonas potencialmente inundables, se incluyeron las infraestructuras, bienes o espacios protegidos en esas zonas y también se tuvo en cuenta el cambio de los usos del suelo. Respecto a los datos del Consorcio de Compensación de Seguros se destaca el municipio de Atarfe, en el que se registraron entre 2005 y 2017 un total de 353 siniestros (Asensio, 2018).

Así, a pesar de no ser uno de los municipios con un mayor número de tramos de riesgo identificados, dado el elevado número de siniestros registrado, el municipio de Atarfe, situado en el sector noroccidental del AUGr, ante los recurrentes y graves problemas de inundaciones, va a encargar a la Spin-Off de la Universidad de Granada GIS4Tech diversos estudios para tratar de resolverlos. Primero fue el "*Estudio hidráulico bidimensional del Barranco del Canalillo a su paso por el núcleo urbano de Atarfe (Granada) y evaluación del riesgo de inundación*", correspondiente al antiguo Barranco del Pozo, incluido en el primer Plan de prevención. Este tendrá como continuación la "*Propuesta de alternativas y estudio hidráulico bidimensional tras la implantación de la alternativa seleccionada en el Barranco del Canalillo a su paso por el núcleo urbano de Atarfe*" y paralelamente se llevará a cabo el estudio de otros dos barrancos que afectan al núcleo urbano "*el Barranco de La Cañada y del Cerro del Almirez*", así como la propuesta y selección de alternativas para su resolución. Estos se van a mostrar como casos ilustrativos de este conflicto entre desarrollo urbano e inundabilidad, dado que lluvias muy prolongadas en el tiempo, asociadas a elevados periodo de retorno, darán lugar a una lámina de inundación bastante extendida por todo el núcleo urbano de Atarfe. Y ello como consecuencia de que dichos cauces naturales fueron alterados y modificado en numerosas ocasiones a causa de las distintas actuaciones urbanísticas. Destaca particularmente el Barranco del Canalillo, cuyo cauce original a su paso por el núcleo urbano fue profundamente transformado, hasta tal punto que en la actualidad no se reconoce ningún cauce debidamente trazado que sirva para canalizar las aguas de su cuenca vertiente y, a pesar de que en su lugar se colocó un colector de pluviales, sin embargo, a éste tampoco se le dotó de salida adecuada (Molero y Hernández, 2017). Así pues, este estudio revelaba que el colector de pluviales de dicho barranco (un tubo de diámetro de 1.000 mm) era insuficiente para recoger los caudales extremos calculados y, del mismo modo, parte del núcleo urbano y de diversos sectores del planteamiento sin desarrollar, resultaban afectados por las avenidas asociadas a los distintos periodos de retorno (Figura 4) (Ruiz, 2018).

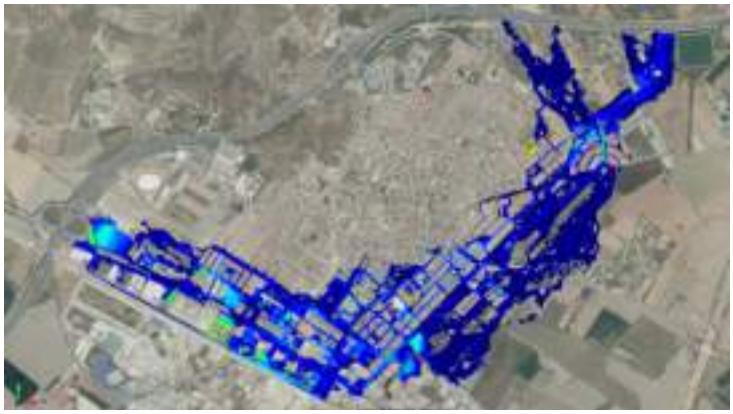


Figura 4. Estudio de inundabilidad del Barranco del Canalillo (Atarfe, Granada) GIS4Tech, S.L. Fuente: https://www.ahoragranada.com/noticias/un-estudio-de-la-ugr-revela-que-el-colector-de-pluviales-del-barranco-del-canalillo-de-atarfe-es-insuficiente/

En los casos de los barrancos de la Cañada y del Cerro del Almirez, estos han sido objeto igualmente de modificaciones en su trazado original (desvíos, encauzamientos y entubamientos), fruto de la presión urbanística, y han sido incorporados a la red de pluviales y acequias del núcleo urbano. Particularmente el de la Cañada fue sustituido por un colector embovedado, independiente de la red unitaria, pero al que no llegaban la mayoría de las aguas de escorrentía, dado que estas terminaban discurriendo superficialmente por la calle homónima hacia el centro del núcleo urbano, de hecho, éste se desborda desde el inicio de su trazado original, tras atravesar las obras de drenaje de la Autovía A-92. Por su parte, el Barranco del Cerro del Almirez, fue desviado por un canal que evita el desbordamiento del cauce y desvía sus caudales al exterior del núcleo urbano (Molero y Hernández, 2018a).

Las soluciones planteadas han sido la continuación de dichos colectores de desvío y restituyendo, aunque sea de forma artificial, los cauces del Canalillo y la Cañada para que tuvieran salida como cursos de agua, con lo que se solventaría en gran medida dicha deficiencia, evitando los problemas más graves de inundabilidad del núcleo y de sectores urbanizable aguas abajo, que en el caso de la Cañada requería arqueta de intercepción y un colector de conexión para reconducir dichas escorrentías. Además, la Autovía a-92 que hace de variante noroeste al núcleo urbano y lo separa de las cuencas naturales de Sierra Elvira, concentra sus caudales vertientes en los drenajes realizados al efecto. Por ello entre las soluciones se propuso también un colector paralelo a la misma que intersecara el conjunto de aguas procedentes de varias subcuencas para agrupar todos sus caudales en un mismo punto, y pudiéndose actuar así sobre los mismos de forma más eficiente y evitando que la lámina de inundación fuese considerablemente más extensa, complementándose todo ello con unas áreas de retención, siguiendo las técnicas de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (Rodríguez, 2017), resultando finalmente un sistema de laminación de las avenidas bastante eficiente, aunque "para garantizar un adecuado comportamiento del sistema de drenaje resulta necesario acometer su redimensionamiento, así como plantear un plan de mantenimiento de la limpieza de los cauces y redes, que mantenga intacta su capacidad de evacuación" (Molero y Hernández, 2018b y c).
De forma similar, el municipio de la capital granadina con su *Plan Municipal de Prevención de Inundaciones*, pondrá de manifiesto cómo una de sus grandes y recientes desarrollos urbanísticos, como será el área del Parque Tecnológico de la Salud (PTS) -en el que se integra el nuevo Hospital Universitario, el Campus Universitario de Ciencias de la Salud (con las facultades de medicina, enfermería, fisioterapia, etc.) y un parque de investigación-, es la zona con más riesgo de inundación de la ciudad, por el desbordamiento del río Monachil, tanto a 10, como a 100 como a 500 años de periodo de retorno (Figura 5), además de los diversos puntos negros en el centro de la ciudad por la insuficiente capacidad del embovedado del río Darro (Vallejo, 2019).



Figura 5. Estudio de inundabilidad del PTS-Campus de la Salud (Granada). Fuente: https://www.granadahoy.com/granada/PTS-zona-riesgo-inundacion-ciudad_0_1402959886.html

5. CONCLUSIONES

Múltiples áreas urbanas muestran recurrentemente con su inundación las graves consecuencias de haber ignorado o maltratado el medio hídrico, y no solo los cauces principales sino también y sobre todo la serie de cauces menores tributarios, pero que afectan de forma relevante a la población. Y es igualmente recurrente cada otoño este fenómeno y la preocupación social sobre las inundaciones, prueba de ello son las noticias que se presentan en el mes de octubre.

La progresiva implantación de la Directiva Europea sobre evaluación y gestión de las inundaciones, está dando lugar a una cierta resolución de esta problemática o, al menos a evitar nuevos errores de desarrollos urbanísticos indiferentes a los riesgos de inundación. De hecho, los nuevos Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) recogen medidas de prevención, protección, preparación y recuperación.

A la vista de los casos expuestos se observan las problemáticas generadas, y de difícil resolución, por desarrollos urbanísticos inapropiados, y la necesidad de una adecuada consideración del medio hídrico en el planeamiento y desarrollo urbanísticos, respetando la continuidad e integridad de los cauces, e integrando soluciones de drenaje urbano sostenible.

REFERENCIAS

- Asensio, A. (2010). Un centenar de municipios están en zona de riesgo de inundaciones. *GRANADAHOY*, 6 octubre 2010. https://www.granadahoy.com/granada/centenar-municipios-zona-riesgo-inundaciones_0_412158850.html
- Asensio, A. (2018). El Cinturón, la zona con más posibilidades de sufrir inundaciones de toda la provincia. *GRANADAHOY*, 23 octubre 2018. https://www.granadahoy.com/granada/Cinturon-posibilidades-sufrir-inundaciones-provincia_0_1293770772.html
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, CHG (2016). *Plan de Gestión del Riesgo de Inundación Ciclo 2016–2021 Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir*. https://www.chguadalquivir.es/pgri
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, CHG (2018). *Resumen de la Implantación de la Directiva 2007/60 de Evaluación y Gestión de Riesgos de Inundación en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, Ceuta y Melilla*. https://www.chguadalquivir.es/gestion-riesgos-de-inundacion
- Consejería de Medioambiente, CMA (2009). *Recomendaciones sobre el contenido mínimo de los instrumentos de planeamiento urbanístico en materia de aguas.* Agencia Andaluza del Agua, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes, COPT (1999). *Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada*. Dirección General de Ordenación del Territorio y Urbanismo, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes, COPT (2002). *Plan de Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en cauces urbanos andaluces.* Junta de Andalucía, Sevilla.
- Figueroa, A. (2011). La integración de la planificación urbanística y la gestión del agua: una aproximación general en Andalucía. *VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua*, Talavera de la Reina. Citado en González (2017).
- Garrido, J. y Sánchez, M. Á. (2019). El Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana (POTAUG). Fundamentos para su necesaria revisión. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 287-305.
- González Rojas, D. (2017). Tratamiento de los espacios fluviales urbanos andaluces en la planificación territorial y sectorial. *Cuadernos Geográficos*, 56(2), 72-93.

- Grindlay Moreno, A. L. y Matarán Ruiz, A. (2011). *Infraestructuras y Políticas del Agua y su relación con el Territorio del Guadalquivir*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.
- Grindlay Moreno, A. L. (2012). Integration of Hydrological and Regional and Urban Planning in Spain. En: J. Burian (Ed.), *Advances in Spatial Planning*, InTech, Rijeka, 331-366. http://cdn.intechopen.com/pdfs/33258/InTech-Integration_of_hydrological_and_regional_and_urban_planning_in_spain.pdf
- Lizárraga Mollinedo, C. y Grindlay Moreno, A. L. (2012). Hacia un modelo de movilidad urbana sostenible en Andalucía. *ACTUALIDAD Centro de Estudios Andaluces*, 65, 1-33. http://www.centrodeestudiosandaluces.es/index.php?mod=publicaciones&cat=18&id=2665&ida=0&idm=
- Molero Melgarejo, E. y Hernández Marín J. (2017). *Estudio Hidráulico Bidimensional del Barranco del Canalillo a su paso por el núcleo urbano de Atarfe (Granada) y Evaluación del Riesgo de Inundación*. GIS4Tech, S.L.
- Molero Melgarejo, E. y Hernández Marín J. (2018a). *Estudio Hidráulico Bidimensional del Barranco de La Cañada y del Cerro del Almirez a su paso por el núcleo urbano de Atarfe (Granada) y Evaluación del Riesgo de Inundación*. GIS4Tech, S.L.
- Molero Melgarejo, E. y Hernández Marín J. (2018b). *Propuesta de alternativas y estudio hidráulico bidimensional tras la implantación de la alternativa seleccionada en el Barranco del Canalillo a su paso por el núcleo urbano de Atarfe (Granada).* GIS4Tech, S.L.
- Molero Melgarejo, E. y Hernández Marín J. (2018c). *Propuesta de alternativas y estudio hidráulico bidimensional tras la implantación de la alternativa seleccionada en el Barranco de la Cañada a su paso por el núcleo urbano de Atarfe (Granada).* GIS4Tech, S.L.
- Rodríguez Rojas, M. I. (2017) *Guía para la Integración de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el Proyecto Urbano*. EUG.
- Ruiz, L. F. (2018). Un estudio de la UGR revela que el colector de pluviales del Barranco del Canalillo es insuficiente. *AHORAGRANADA* 24 mayo, 2018. https://www.ahoragranada.com/noticias/un-estudio-de-la-ugr-revela-que-el-colector-de-pluviales-del-barranco-del-canalillo-de-atarfe-es-insuficiente/
- Vallejo, I. (2000). Las inundaciones en la cuenca del Guadalquivir. *Serie Geográfica*, 9, 133 - 149
- Vallejo, S. (2019). El PTS, la zona con más riesgo de inundación de la ciudad. *GRANADAHOY*, 22 octubre 2019. https://www.granadahoy.com/granada/PTS-zona-riesgo-inundacion-ciudad_0_1402959886.html

VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL SEGURA DURANTE 1951-2018

Amar Halifa-Marín
Grupo de Modelización Atmosférica Regional, Universidad de Murcia, España
amar.halifa@um.es
https://orcid.org/0000-0002-2388-1598

Miguel Ángel Torres Vázquez
Grupo de Modelización Atmosférica Regional, Universidad de Murcia, España
miguelangel.torres@um.es

Juan Andrés García-Valero
Delegación Territorial de AEMET en Murcia, Guadalupe, España
jugarciav@aemet.es
https://orcid.org/0000-0002-3914-6328

Antonio Jesús Castillo Cascales
Departamento de Historia y Geografía, IES Mediterráneo, España
antoniojesus.castillo@murciaeduca.es

Juan Esteban Palenzuela Cruz
Delegación Territorial de AEMET en Murcia, Guadalupe, España
jpalenzuelac@aemet.es

RESUMEN

Este estudio analiza la variabilidad espaciotemporal de las precipitaciones en la Demarcación Hidrográfica de Segura (DHS). Utilizando una base de datos reticular creada en AEMET, con resolución de 5 km^2, fueron cuantificados el cambio de la precipitación mensual entre climatologías (1985-2018 respecto a 1951-1984) y la tendencia de la precipitación y días de lluvia (>1 mm) durante 1951-2018. Para establecer la relación entre esos cambios y la dinámica de larga escala, 12 patrones de teleconexión fueron empleados para estudiar su tendencia y modulación de la precipitación en la cuenca. Los resultados mostraron una reducción importante de la precipitación en diciembre y marzo en la cabecera de la DHS, probablemente relacionada con la tendencia observada en NAO y AO. Cambios de la precipitación en abril (disminución) y septiembre (aumento) fueron asociados, con cierta incertidumbre, a la variabilidad de ENSO, EA y WeMO. Solo junio mostró tendencia significativa (-) en promedio espacial, lo que se relacionó con SCAND y EA. La tendencia de los días lluviosos en septiembre fue negativa, aunque la precipitación aumentó. En cambio, la precipitación y los días lluviosos disminuyeron en octubre, mes más húmedo durante 1951-1984 en amplias áreas de la cuenca.

1. INTRODUCCIÓN

La *European Environment Agency* (EEA) considera que la cuenca mediterránea será la región europea afectada por un mayor número de impactos a consecuencia del cambio climático (EEA, 2017). Esos cambios no se basan únicamente en proyecciones, advierte, sino que se han observado durante las últimas décadas. Entre muchos impactos esperados en esta región, alerta sobre el riesgo

de la reducción de las precipitaciones y la escorrentía, el incremento de las sequías, o una mayor demanda de agua para la agricultura (EEA, 2017). Estos impactos afectarán al área mediterránea de la Península Ibérica (PI), región en la que recientes estudios han cuantificado cambios en la precipitación. Sirvan como referencias las aportaciones de Miró *et al.* (2018) sobre la variabilidad en la precipitación estacional de las demarcaciones hidrológicas del Segura (DHS) y Júcar (DHJ); de Gómez-Martínez *et al.* (2018), que advierten de una importante reducción de la escorrentía en la DHJ causada por la reducción severa de las precipitaciones en cabecera; y de Camarasa-Belmonte *et al.* (2020), donde se estudian los cambios en la precipitación según su intensidad horaria en la DHJ. Esos autores coinciden en concluir: 1) que los eventos de precipitación moderada y duradera (frentes atlánticos, precipitación de recurso) disminuyen; mientras que 2) la intensidad en los eventos extremos (génesis mediterránea, precipitación de riesgo) aumenta. Es claro que estos cambios en el régimen pluviométrico conllevan numerosos impactos en la salud humana (incremento del riesgo por eventos hidrológicos extremos), ambientales (reducción de los recursos hídricos), económicos (pérdidas económicas asociadas a los eventos extremos), entre otros. Asimismo, conocer mejor la variabilidad espaciotemporal de la precipitación en entornos semiáridos con alta demanda de recursos hídricos, como la DHS, puede ser muy beneficioso en la gestión y planificación hidrológica ante el reto que el calentamiento global supone (Aldaya *et al.,* 2019). También resulta inspirador que Gómez-Martínez *et al.* (2018) apunten al índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) como causa principal del descenso de la escorrentía en la cabecera de la DHJ. Son bien conocidos los resultados de Trigo *et al.* (2004), que mostraron la relación intensa entre NAO y la precipitación, y en consecuencia, con los recursos hídricos en numerosas áreas de la PI. Sin embargo, Martin-Vide y López-Bustins (2006) mostraron que NAO no es tan útil en la franja mediterránea, proponiendo el uso de la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO). En realidad, existen numerosos patrones de teleconexión que influyen sobre la cuenca mediterránea que se unen a NAO y WeMO. Por ejemplo, Mariotti *et al.* (2002) mostraron que ENSO correlaciona bien con la precipitación en la cuenca mediterránea en primavera y verano; y Ríos-Cornejo *et al.* (2015) aplicaron la Oscilación del Ártico (AO) y del Atlántico Este (EA) con buenos resultados en algunos meses para ciertas áreas de la PI. Todos estos trabajos evidenciaron que los patrones de teleconexión son una buena herramienta para entender la variabilidad climática local y regional. Además, el establecimiento de relaciones entre patrones y la variabilidad climática ayuda no sólo a entender mejor los cambios que se están produciendo, sino también, a aquellos cambios proyectados bajo los diferentes escenarios de cambio climático.

Este estudio intenta contribuir al conocimiento científico sobre la variabilidad espaciotemporal de las precipitaciones en cuencas mediterráneas semiáridas, afectadas por la recurrencia de eventos extremos, donde la escasez de recursos hídricos es un problema crucial debido a la alta demanda de agua por las actividades socioeconómicas. Tiene como objetivos: 1) analizar a escala de cuenca los cambios en la precipitación, mediante el cambio en la precipitación media mensual entre periodos climatológicamente representativos (34 años), y la tendencia mensual de la precipitación y los días de lluvia mayor a 1 mm durante el periodo 1951-2018; y 2) relacionar esos cambios de la precipitación con patrones de teleconexión, correlacionando esas teleconexiones con el acumulado mensual y los días de lluvia mensuales, y 3) analizar la tendencia en dichos índices, identificando cambios en la dinámica de larga escala.

2. MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La DHS se localiza en el sureste de la Península Ibérica, en su franja mediterránea, entre los 39ºN, 37ºS, -2,7ºW y -0.3ºE (Fig. 1).

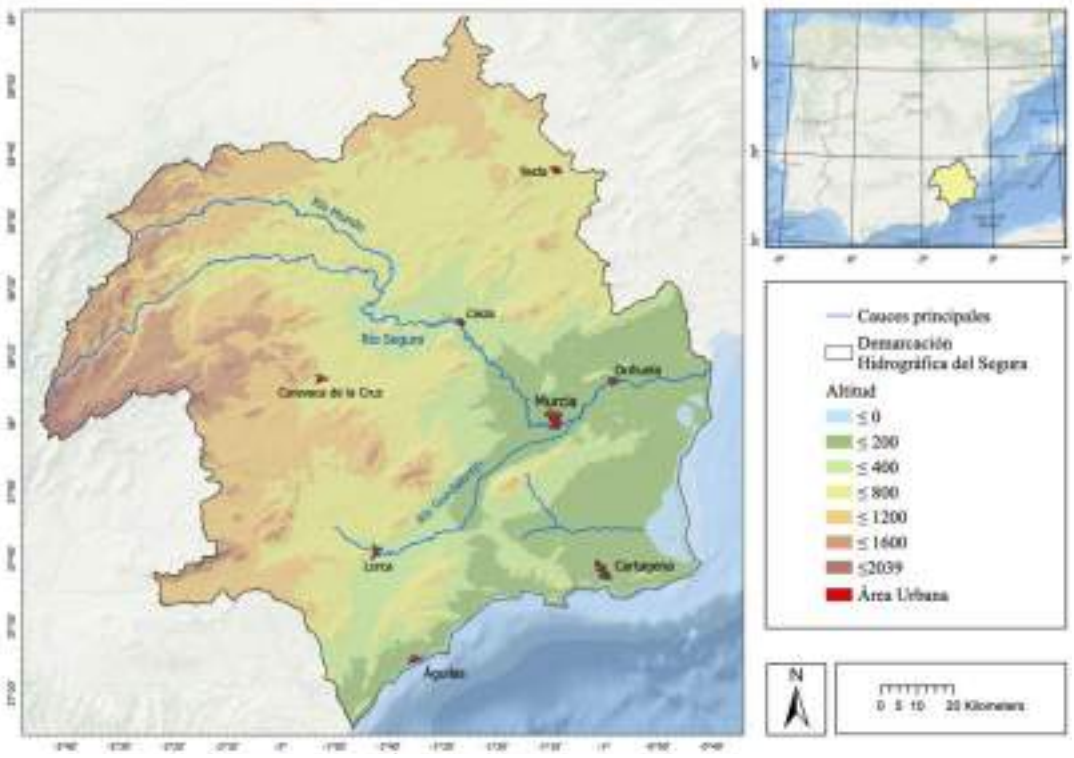


Figura 1. Cartografía de la DHS: localización, relieve, cauces y poblaciones principales.

La cuenca tiene una superficie continental de 19.025 km^2, y en 2019 albergaba 1.978.875 habitantes (CHS, 2020). En el texto se destacan algunas áreas de la DHS. El área de cabecera, en el extremo noroeste, la región más montañosa de la cuenca. Litoral oriental, que comprende el Campo de Cartagena y Mar Menor. Extremo sur se refiere al resto del litoral. Como extremo oeste de la DHS, las sierras de María y Gigante, interior de Lorca, etc.; y como extremo norte, las tierras de Albacete dentro de la DHS. Por último, extremo este u oriental, la Vega Baja (Alicante), sierras de la Pila, Carche y Altiplano de Yecla-Jumilla.

2.2. Datos

2.2.1. Precipitación

La base de datos utilizada es la serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos, Versión 2 de 2019, proporcionada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Esta base de datos es pública, de tipo reticular, con resolución de ~0,05º (5 km^2), construida a partir de reanálisis generados con el modelo HIRLAM y alimentada con las observaciones registradas en el Banco Nacional de Datos Climatológicos, un total de 3.236 estaciones. Proporciona información a escala diaria sobre el territorio peninsular de España y Baleares, entre el 1 de enero de 1951 y el 31 de diciembre de 2018 (versión 2 de 2019). Para más detalles acerca de esta base de datos leer la nota técnica adjunta en el directorio donde se aloja (AEMET, 2019).

2.2.2. Índices de los patrones de teleconexión

Los patrones de teleconexión se refieren a patrones de anomalías a gran escala (escala sinóptica) de alguna variable climática, como la presión en superficie, la temperatura superficial del agua en océanos, la altura geopotencial en un nivel de presión concreto, etc. En general, los patrones de teleconexión se definen a partir de índices que cuantifican la diferencia entre dichas anomalías en regiones distantes y donde la señal de la anomalía es intensa y de signo contrario. Dependiendo de como se defina el índice y de su signo, se habla de fase positiva (+) o negativa (-) del patrón de

teleconexión. Dependiendo del tipo de patrón, la evolución de los índices de teleconexión suele presentar una importante variabilidad intranual, interanual e interdecadal. Este estudio analiza el papel de 12 patrones de teleconexión en la modulación de la precipitación de la DHS durante las últimas décadas (periodo 1951-2018). La tabla 1 muestra los patrones de teleconexión empleados, como descargar los datos, y enlaces para obtener más información sobre cada patrón. Las series se descargaron completas en el periodo 1951-2018, por lo que no se ha realizado ningún control de calidad ni relleno de datos.

Nombre	Fuente	Información sobre el patrón
NAO	KNMI (2020), CPC	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml
AO	KNMI (2020) NCEP/CPC	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml
EA	KNMI (2020), CPC	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml
EAWR	KNMI (2020), CPC	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/eawruss.shtml
SCAND	KNMI (2020), CPC	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand.shtml
POLEUR	KNMI (2020), CPC	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur.shtml
AMO	KNMI (2020), HadSST	Metodología de van Oldenborgh *et al.* (2009), basado en HadSST 4.0.0.0
ENSO-NINO3	KNMI (2020), absolute	Operando con NOAA ERSSTv5 (in situ solo), SSTA normalizada con 1981-2010
ENSO-NINO3.4	KNMI (2020), absolute	Operando con NOAA ERSSTv5 (in situ solo), SSTA normalizada con 1981-2011
ENSO-NINO12	KNMI (2020), absolute	Operando con NOAA ERSSTv5 (in situ solo), SSTA normalizada con 1981-2012
MOI1	CRU-MOI (2020)	Diferencia de presión en superficie entre Argel y El Cairo
WeMO	CRU-MOI (2020)	Idem que MOI1, entre Padua y San Fernando (Martin-Vide y López-Bustins, 2006)

Tabla 1. Patrones de teleconexión utilizados.

2.3. Análisis

Este estudio se ha realizado completamente en CDO (Schulzweida, 2019), y RStudio como interfaz para manejar el lenguaje de programación R. En primer lugar, se prepararon los datos de precipitación mediante el software CDO. A partir de los datos de precipitación en estado original (como se obtuvieron), se computó el acumulado de precipitación mensual (*cdo monsum*), y las series del acumulado mensual de días de lluvia >1 mm (*cdo gtc* y *cdo monsum*). Los datos se conviritieron a una malla regular de 5 km^2, y se recortaron sobradamente los límites de la DHS (*cdo remapcon y cdo setlonlatbox*), facilitando el manejo de los datos. Como última etapa del preprocesamiento, se computó el promedio mensual de MOI1 en RStudio. Por su parte, todas las operaciones fueron realizadas en RStudio. La tendencia fue analizada mediante las funciones *mk.test* y *sen.slope* (R Trend package); prueba t de Student mediante *t.test* y la correlación bajo el método de Pearson mediante *cor.test* (R Stats Package); y el acumulado con *sum* y promedio con *mean* (R Base package). Más información sobre estas funciones puede ser revisada en el glosario de funciones de su respectivo paquete en el repositorio de RCRAN. Asimismo, el cambio relativo medio de la precipitación mensual se computó como el cociente entre la diferencia del periodo final (1985-2018) y el inicial (1951-1984), y el periodo inicial, expresado en porcentaje.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Climatologías de la precipitación mensual y días lluviosos

Los meses secos fueron junio, julio y agosto, siendo julio el mes más seco de media con 6,5 mm (Fig. 2). En cambio, los meses húmedos en la DHS fueron abril, octubre y noviembre, siendo octubre el mes más húmedo de media con 45,9 mm. Pero, el acumulado mensual medio mostró grandes diferencias entre áreas de la cuenca. Las precipitaciones en el área húmeda de la cuenca (cabecera, en el extremo noroeste) se concentran entre noviembre y mayo (principalmente en invierno). Diciembre registró el mayor acumulado medio en el área de cabecera (120-140 mm), aunque siempre se superaron los 100 mm entre noviembre y marzo. En el área de cabecera, la precipitación mensual media siempre fue superior al promedio espacial de la DHS, aunque esa amplitud cambia cada mes.

La diferencia entre los acumulados en la cabecera y el conjunto de la cuenca fue mayor en invierno, entre diciembre y marzo.

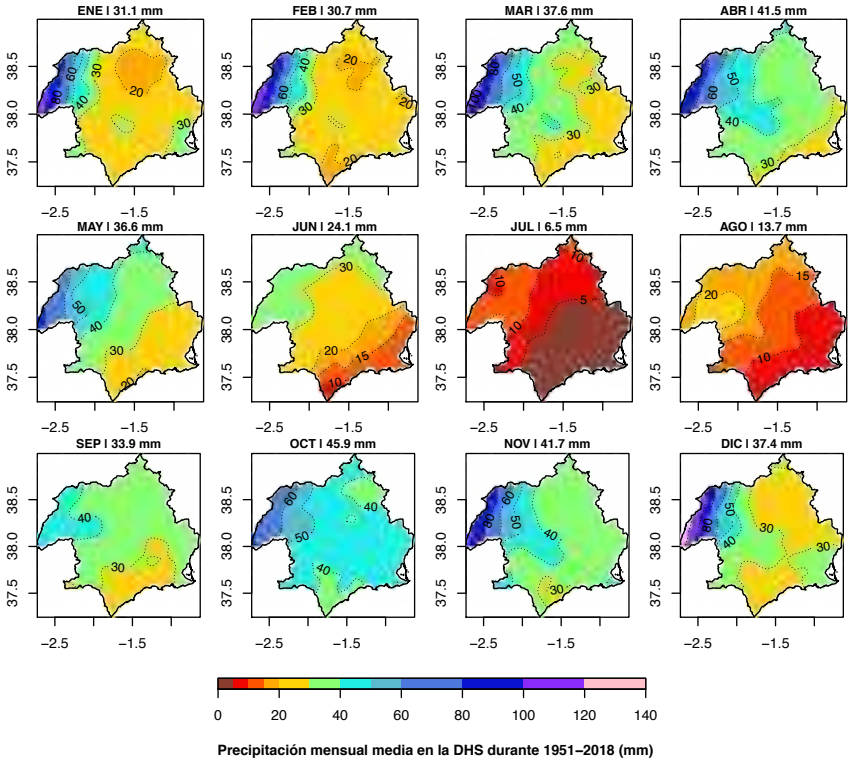


Figura 2. Precipitación mensual media en la DHS durante 1951-2018.

Por el contrario, esa diferencia fue menor entre junio y octubre. Además, destacó el patrón espacial del promedio mensual en agosto, modulado por tormentas de verano; y el acumulado medio en el litoral oriental en diciembre y enero, más importante que abril y similar al de septiembre. La variabilidad mensual de las precipitaciones también fue analizada con el estudio de la ocurrencia de lluvia mayor que 1 mm, denominados en el texto como días lluviosos. La climatología de días lluviosos en la DHS (Fig. 3), mostró la mayor frecuencia de días lluviosos en abril (6,3 días/año), y la menor en julio (1,1). La cabecera de la DHS registra más días lluviosos que cualquier otra área en todos los meses. En cabecera, el promedio mensual de días lluviosos fue >10 entre noviembre y mayo.

Mientras, el litoral registró <1 día lluvioso como promedio en julio y agosto.

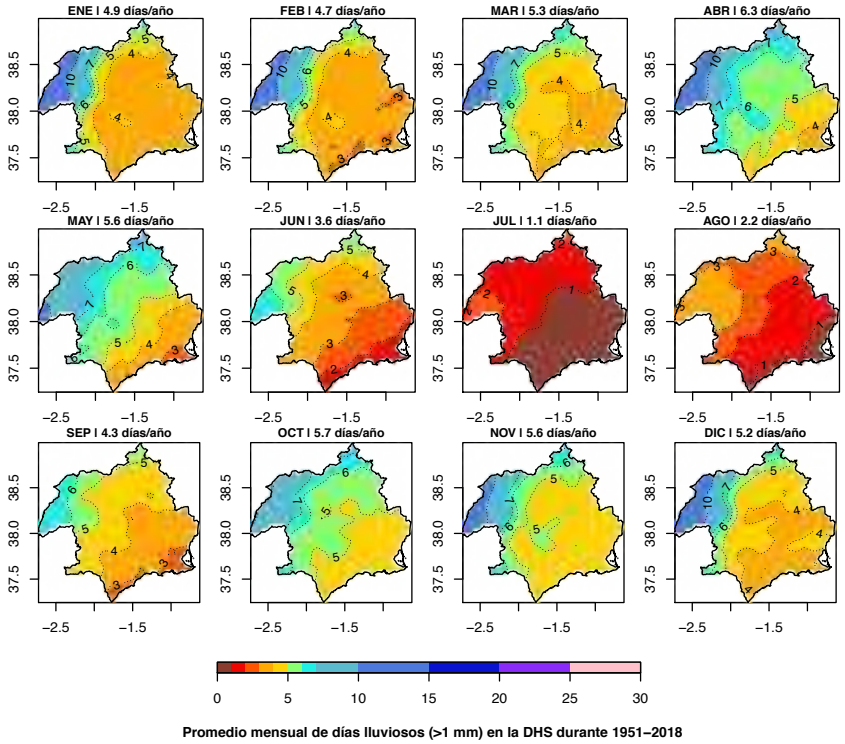


Figura 3. Promedio mensual de días de lluvia en la DHS durante 1951-2018.

3.2. Cambios en la precipitación mensual media

La tendencia de la precipitación media mensual de la DHS fue positiva en enero (0,05 mm/año), febrero (0,03), marzo (0,12), agosto (0,03), septiembre (0,21) y noviembre (0,15), y negativa en el resto, especialmente en abril (-0,22), octubre (-0.28) y diciembre (-0,14). Las series de anomalías se muestran en la Figura 4, donde también se aclara la tendencia de Sen, significancia bajo la prueba de Mann-Kendall y el promedio mensual. Solo en junio la tendencia fue significativa al 95%. El cambio relativo de la precipitación mensual entre dos periodos de 34 años fue analizado (Fig. 5). Destacaron los cambios en abril con -28,5 % de promedio espacial, y septiembre con 61,6 %.

Además de septiembre, el cambio mensual medio fue positivo en enero (11,6 %), febrero (29), marzo (21,4), agosto (1,3), noviembre (25,3) y diciembre (5,8).

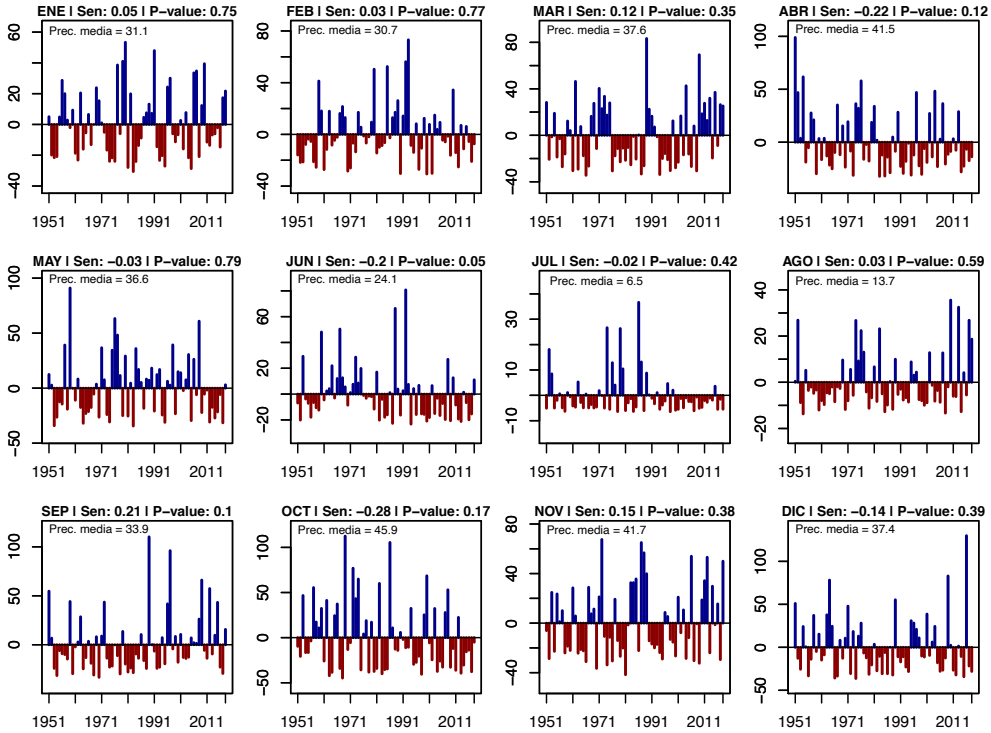


Figura 4. Anomalía de la precipitación mensual media en la DHS durante 1951-2018. Se aclara la tendencia de Sen, *p-value* asociado mediante la prueba de Mann-Kendall y la precipitación media en el periodo completo.

Los cambios estadísticamente significativos ocurrieron en septiembre en la mayor parte de la DHS, y localmente en abril, junio, octubre y noviembre. Destacó el cambio entre diciembre y marzo debido a la amplia disparidad entre la cabecera (~15 %) y el resto de la cuenca (en general positivo). Estos resultados difieren muy poco con Miró *et al.* (2018), que presentaron un cálculo similar para la DHS y DHJ, a escala estacional, basado en observaciones de estaciones meteorológicas durante 1950-2016. Estos autores encontraron un cambio de la precipitación invernal media similar al mostrado en este estudio para esos meses (Fig. 5); mientras que este estudio mostró una mayor reducción en los meses de primavera, y mayores incrementos en otoño.

Además, también cuantificaron un cambio negativo en la cabecera de la DHS, excepto en otoño, resultado con el que difiere este estudio, que salvo en septiembre, arrojó cambio negativo de la precipitación media.

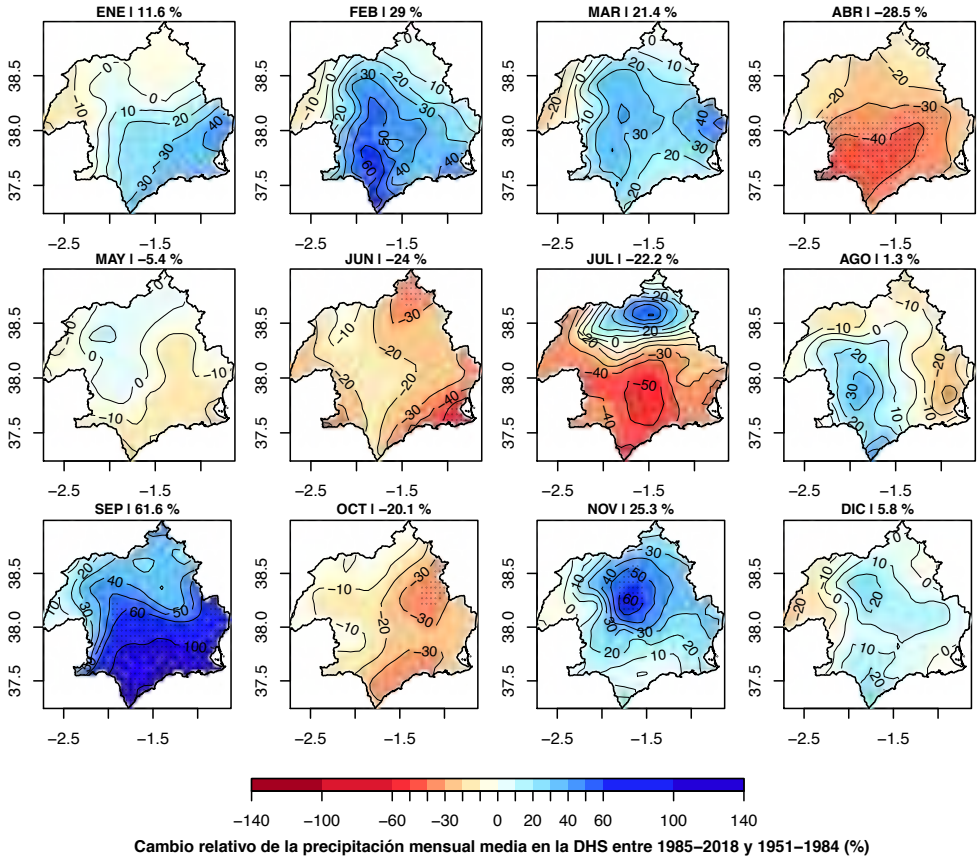


Figura 5. Cambio de la precipitación media entre los periodos 1985-2018 y 1951-1984. Significancia al 95 % (prueba) mediante la prueba t de Student.

3.3. Tendencia de la precipitación y los días lluviosos

En cuanto a la tendencia de la precipitación mensual (Fig. 6), generalmente fue positiva en enero, febrero, marzo, agosto, septiembre y noviembre. Áreas donde la tendencia negativa fue significativa fueron encontradas en abril (suroeste de la DHS), junio (interior y litoral oriental), julio (localmente al oeste), octubre (sur y este), mientras que septiembre mostró tendencia positiva significativa en el sureste y oeste de la DHS, y agosto localmente en el interior. Además, destacó la tendencia de diciembre en el área de cabecera (alcanzando -0,9 mm/año) aunque no fue detectada significancia estadística (*p-value* ~0,06), mostró valores cercanos a 1 mm/año. Por su parte, la tendencia de los días lluviosos en la DHS fue generalmente negativa (Fig. 6). Los meses con mayor tendencia fueron marzo, abril, junio, octubre y diciembre. En promedio espacial, la tendencia más intensa y significativa ocurrió en junio (-0,03 días/año), aunque también destacó en abril (-0,02). Sin embargo, la tendencia negativa más intensa se observó en diciembre (-0,12) y en marzo (-0,08) en la cabecera de la DHS. La tendencia positiva fue significativa localmente en septiembre (0,005) y noviembre (0,001). Estos resultados son cuidadosamente comparables con los resultados de otros autores. En el caso de Miró *et al.* (2018), presentaron la tendencia de los días lluviosos bajo diferentes umbrales y los *wet spells* (días consecutivos de lluvia) sobre la DHS y DHJ, pero a escala anual. Así, resulta complicado revisar posibles similitudes. Camarasa-Belmonte *et al.* (2020) mostraron que las precipitaciones asociadas a una mayor recuperación de los recursos hídricos en la DHJ son más frecuentes en abril, marzo, noviembre y diciembre. Debido a la proximidad geográfica, la reducción de la precipitación en abril en la DHS y de la precipitación en marzo y diciembre sobre la cabecera (Fig. 5, 6 y 7), podría ser asociada a descensos importantes en la recarga de los recursos hídricos. Sin embargo, los cambios obtenidos para la precipitación mensual media entre noviembre y marzo (Fig. 5) permiten pensar que hubo una mayor recarga en esa temporada. No en la cabecera, donde todos

los meses excepto septiembre la precipitación media disminuyó (Fig. 5), y la tendencia de la precipitación y los días de lluvia fue negativa generalmente (Fig. 6 y 7).

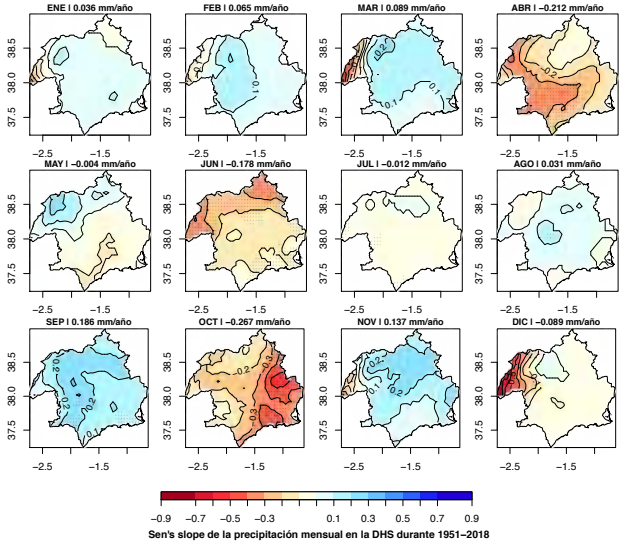


Figura 6. Tendencia de Sen de la precipitación mensual entre 1951-2018. Puntos: significancia estadística al 95 % (puntos) mediante la prueba de Mann-Kendall.

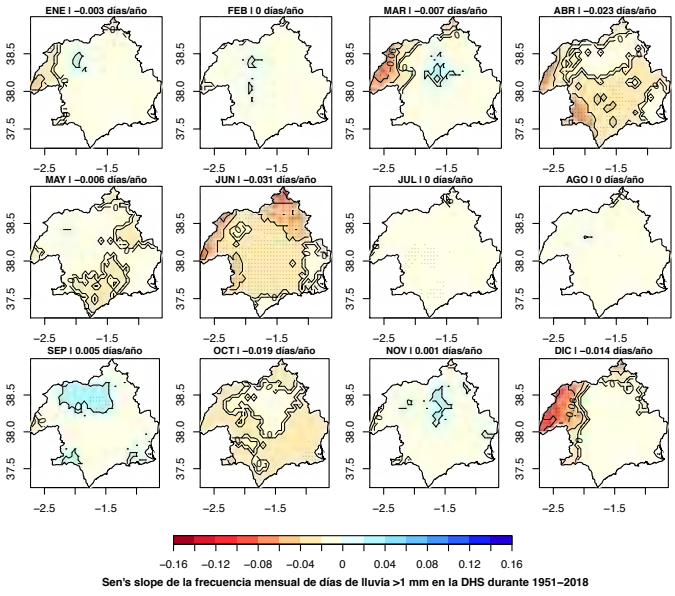


Figura 7. Tendencia de Sen de la frecuencia mensual de días lluviosos (>1 mm) en la DHS. Significancia al 95% (puntos) mediante la prueba de *Mann-Kendall*.

3.4. Teleconexiones y su modulación de la precipitación

En primer lugar, fue analizada la correlación mensual entre la precipitación y los patrones de teleconexión o teleconexiones (Tabla 2). Dada la extensión limitada de esta comunicación, solo se argumentan los resultados para aquellos meses en los que la tendencia de la precipitación fue mayor (Fig. 4): abril, junio, septiembre, octubre y diciembre. En abril, correlacionó significativamente con EA (-0,35), WeMO (-0,26) y ENSO-NINO3 (-0,21). En junio, destacó la correlación con SCAND (0,41), MOI1 (0,30), NAO (0,22) y EA (-0,22). En septiembre destacó WeMO (-0,45), MOI1 (-0,39), ENSO-NINO3 (0,35), ENSO-NINO12 (0,34), ENSO-NINO3.4 (0,33), EA (0,21) y NAO (0,21). En

octubre destacó MOI1 (-0,28) y NAO (0,26). Por último, en diciembre mostró correlación intensa con WeMO (-0,37), MOI1(-0,36) y NAO (-0,25). Asimismo, la correlación entre las teleconexiones y los días lluviosos aparece en la Tabla 3. Es necesario indicar que las correlaciones, en general, fueron mayores con los días lluviosos (Tabla 3) que con la precipitación mensual (Tabla 2).

	NAO	WeMO	EA	EAWR	SCAND	POLEUR	AO	AMO	NINO12	NINO3	NINO3.4	MOI1
ENE	**-0.25**	**-0.34**	0.05	0.03	0.18	-0.06	**-0.22**	0.08	-0.01	0.00	0.02	**-0.38**
FEB	-0.09	**-0.41**	-0.17	0.20	0.15	0.20	-0.03	-0.10	-0.07	0.04	0.09	-0.06
MAR	0.07	**-0.30**	-0.05	0.14	-0.01	0.04	0.14	-0.15	-0.13	**-0.22**	-0.20	**-0.33**
ABR	0.17	**-0.26**	**-0.35**	-0.10	-0.12	0.00	0.12	0.02	-0.15	**-0.21**	-0.16	-0.16
MAY	-0.02	**-0.29**	**-0.37**	0.01	0.16	-0.05	-0.10	-0.17	0.06	0.02	-0.07	**-0.40**
JUN	**0.22**	-0.04	**-0.22**	0.15	**0.41**	0.16	0.05	-0.12	-0.05	-0.12	-0.12	**-0.30**
JUL	0.01	-0.03	-0.17	0.01	-0.09	-0.01	0.03	-0.14	0.04	0.08	0.04	-0.13
AGO	0.18	-0.20	-0.01	**-0.25**	-0.02	**0.25**	0.12	0.07	0.05	0.04	-0.01	-0.17
SEP	**0.21**	**-0.45**	**-0.21**	-0.03	-0.05	0.08	0.03	0.14	**0.34**	**0.35**	**0.33**	**-0.39**
OCT	**0.26**	-0.13	-0.13	0.06	0.03	0.03	0.07	-0.18	0.16	0.18	0.20	**-0.28**
NOV	-0.02	**-0.43**	0.00	0.14	-0.05	-0.02	-0.05	0.02	0.12	0.06	0.04	**-0.33**
DIC	**-0.25**	**-0.37**	-0.05	0.05	-0.18	-0.17	-0.09	0.14	-0.04	-0.06	-0.06	**-0.36**

Tabla 2. Media espacial de la correlación mensual entre la precipitación y los índices de teleconexión durante 1951-2018. Valores significativos al 95 % en negrita.

	NAO	WeMO	EA	EAWR	SCAND	POLEUR	AO	AMO	NINO12	NINO3	NINO3.4	MOI1
ENE	**-0.38**	**-0.46**	0.04	0.01	**0.28**	0.00	**-0.34**	0.05	-0.02	-0.04	-0.03	**-0.52**
FEB	**-0.25**	**-0.47**	-0.11	0.14	**0.25**	**0.26**	-0.14	0.08	-0.09	0.01	0.06	**-0.27**
MAR	-0.14	**-0.33**	-0.03	**0.23**	0.11	0.17	0.00	-0.05	-0.20	**-0.22**	-0.16	**-0.50**
ABR	0.15	**-0.33**	**-0.44**	0.01	-0.07	0.07	0.18	-0.04	**-0.21**	**-0.28**	**-0.26**	**-0.27**
MAY	0.00	-0.20	**-0.43**	-0.02	0.15	-0.07	-0.11	-0.11	-0.01	-0.07	-0.15	**-0.45**
JUN	**0.24**	-0.05	**-0.27**	0.11	**0.44**	0.14	0.06	-0.06	-0.10	-0.19	-0.16	**-0.33**
JUL	0.01	-0.04	-0.15	0.02	-0.03	0.05	0.04	-0.05	0.04	0.10	0.06	-0.18
AGO	**0.25**	-0.16	-0.08	**-0.26**	0.05	0.16	0.14	0.08	0.10	0.10	0.08	**-0.22**
SEP	**0.26**	**-0.41**	**-0.24**	0.07	0.04	0.12	-0.03	0.15	**0.24**	**0.26**	**0.24**	**-0.37**
OCT	**0.26**	**-0.31**	**-0.25**	0.09	0.07	0.08	0.05	-0.03	0.12	0.15	0.19	**-0.45**
NOV	-0.06	**-0.53**	-0.07	0.15	0.10	0.08	-0.12	0.06	0.06	-0.01	-0.02	**-0.50**
DIC	**-0.48**	**-0.49**	-0.15	0.05	**-0.24**	-0.18	**-0.27**	0.06	-0.11	-0.09	-0.07	**-0.55**

Tabla 3. Media espacial de la correlación mensual entre la precipitación y los índices de teleconexión durante 1951-2018. Valores significativos al 95 % en negrita.

En cuanto a la tendencia de las teleconexiones, la Tabla 4 muestra los resultados para cada mes e índice. Las principales tendencias en los meses seleccionados son: i) en abril, WeMO (-0,024 puntos/año), EA (0,022) y ENSO-NINO3 (0,009); ii) en junio, WeMO (-0,032), EAWR (-0,023), SCAND (-0,019), ENSO-NINO12, ENSO-NINO3 (0,016 y 0,012), y AMO (0,004); iii) en septiembre, la tendencia fue significativa en WeMO (-0,022), EAWR (-0,017), EA (0,013), ENSO-NINO12, ENSO-NINO3 (0,012, ambos) y AMO (0,005); en octubre, WeMO (-0,026), EA (0,02), NAO (-0,017), EAWR (-0,014), POLEUR (-0,012) y AMO (0,005); y, por último, iv) en diciembre destacó la tendencia de EA (0,028), POLEUR (-0,016), NAO (0,013) y MOI1 (0,008).

	NAO	WeMO	EA	EAWR	SCAND	POLEUR	AO	AMO	NINO12	NINO3	NINO3.4	MOI1
ENE	**0.016**	-0.006	**0.029**	-0.002	0.001	**-0.021**	0.014	0.001	**0.012**	0.003	0.001	0.004
FEB	**0.021**	-0.008	**0.014**	0.004	0.005	**-0.02**	**0.021**	0.001	**0.011**	0.002	0	0.003
MAR	**0.022**	-0.004	**0.016**	-0.003	-0.006	**-0.014**	**0.017**	0.001	**0.011**	0.004	0.002	0.003
ABR	0.011	**-0.024**	**0.022**	0.009	-0.012	-0.009	0.005	0.001	0.013	**0.009**	0.006	-0.001
MAY	-0.004	**-0.035**	**0.013**	-0.012	-0.002	-0.002	0.008	0.002	0.015	**0.012**	0.006	-0.001
JUN	-0.008	**-0.032**	0.009	**-0.023**	**-0.019**	0.003	0.001	**0.004**	**0.016**	**0.012**	0.007	0
JUL	-0.007	**-0.029**	**0.031**	-0.012	0.005	0.008	0	**0.004**	**0.015**	**0.012**	0.007	0
AGO	-0.002	**-0.029**	**0.033**	**-0.02**	**-0.015**	**0.02**	0.006	**0.005**	**0.013**	**0.01**	0.008	-0.001
SEP	0.004	**-0.022**	**0.013**	**-0.017**	-0.001	0	0.006	**0.005**	**0.012**	**0.012**	0.009	-0.001
OCT	**-0.017**	**-0.026**	**0.02**	**-0.014**	-0.01	**-0.012**	-0.007	**0.005**	0.01	0.011	0.008	-0.002
NOV	0.007	-0.011	**0.022**	0.002	-0.005	-0.005	**0.013**	0.003	0.009	0.01	0.007	-0.001
DIC	**0.013**	-0.01	**0.028**	-0.002	-0.007	**-0.016**	0.01	0.002	0.011	0.008	0.006	**0.008**

Tabla 4. Tendencia mensual de los índices de teleconexión mediante la tendencia de Sen durante 1951-2018. Valores significativos al 95 % con Mann-Kendall, en negrita.

Además, destacan otros resultados en la Tabla 4: NAO mostró tendencia positiva y significativa en casi todos los meses comprendidos entre octubre y marzo, temporada en la que su relación con la

climatología de la PI es más importante (Trigo *et al.,* 2004); WeMO mostró tendencia negativa significativa entre abril y octubre, aunque su tendencia fue negativa en todos los meses. Es bien conocido que fases negativas de WeMO están relacionadas con mayores acumulados de precipitación en la franja mediterránea de la PI (Martin-Vide y López-Bustins, 2006). EA mostró tendencia significativa en todos los meses excepto junio; y AMO mostró tendencia positiva significativa entre junio y octubre; y ENSO-NINO3 entre abril y septiembre.

3.4.1. Modulación atlántica de la precipitación invernal en cabecera

La correlación de los días lluviosos con NAO y AO mostró una relación intensa en la temporada de diciembre a marzo. MOI1 también. NAO y AO se relacionan con la ocurrencia de borrascas atlánticas en la PI (Ríos-Cornejo *et al.,* 2015). La tendencia positiva en NAO (significativa) y AO en diciembre, indujo a asociarlo con la reducción de la precipitación (Fig. 4) y los días lluviosos (Fig. 5) durante 1951-2018. Esta idea fue propuesta por Gómez-Martínez *et al.* (2018), que advirtieron la relación entre la caída de la escorrentía y la precipitación en cabecera de la DHJ y fases de NAO+ más frecuentes en invierno durante las últimas décadas. No obstante, la Figura 6 muestra que toda la cuenca se correlacionó intensamente con NAO en diciembre, pero la reducción de la precipitación solo se observó en cabecera (Fig. 4). Esto podría explicarse con la influencia de WeMO, con tendencia negativa (Tabla 2), que mostró correlación muy alta (Fig. 6) en toda la DHS excepto en la cabecera. Por tanto, el incremento de la precipitación media en diciembre en la mayor parte de la DHS podría tener origen mediterráneo (WeMO-), mientras que la reducción en cabecera se debería a una menor frecuencia de borrascas atlánticas (NAO+ y AO+). Resultados similares fueron encontrados en marzo (principalmente), enero y febrero. Es importante tener en cuenta que, los recursos hídricos en la DHS son más sensibles a cambios de la precipitación en cabecera (área húmeda) que en el resto de la cuenca (Aldaya *et al.*, 2019).

3.4.2. ENSO como modulador de la precipitación de abril y septiembre

Para todo el territorio de la DHS, destacaron la tendencia y cambio en abril, junio, octubre (de signo negativo) y septiembre (positivo) (Fig. 5). En dichos meses, la tendencia de los días lluviosos fue negativa salvo en septiembre que fue débilmente positiva (Fig. 7). En cambio, la precipitación si tuvo tendencia positiva en septiembre (Fig. 6), lo que induce a pensar que el acumulado diario medio aumentó en ese mes. Es necesario destacar la correlación de ENSO. En primer lugar, la correlación entre los tres índices NINO y los días lluviosos en abril y septiembre fue significativa (Tabla 3). Esa correlación fue más intensa con ENSO-NINO3, teleconexión que mostró tendencia positiva y significativa en esos meses (Tabla 4). Dado el patrón de correlación en ambos meses (negativo en abril, positivo en septiembre), esta teleconexión podría contribuir en el cambio medio y tendencia de la precipitación observados (Fig. 5 y 6). En cambio, la tendencia de ningún otro patrón coincidió en ambos meses con el cambio en la precipitación y días lluviosos de esos meses. Precisamente, la Figura 8 muestra las mayores correlaciones con las teleconexiones en abril, junio y septiembre y diciembre.

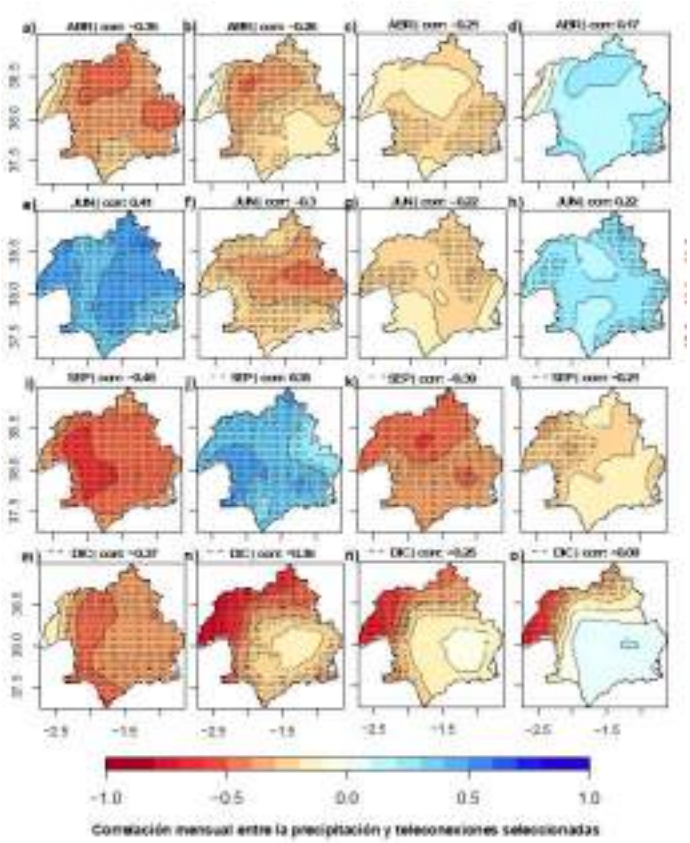


Figura 8. Correlación entre la precipitación y teleconexiones en la DHS durante 1951-2018. En abril, a) WeMO, b) EA, c) ENSO-NINO3, d) NAO. En junio, e) SCAND, f) EA, g) NAO, h) MOI1. En septiembre, i) WeMO, j) ENSO-NINO3, k) MOI1, l) EA. En diciembre, m) WeMO, n) MOI1, ñ) NAO, p) AO.

Tanto en abril, en tercera posición de importancia, como en septiembre, en segunda, ENSO-NINO3 destacó (Fig. 8). No obstante, una alternativa es conectar la tendencia de EA con el cambio en la precipitación de abril; y la tendencia de WeMO con el cambio en septiembre (Tabla 4, Fig. 6 y 8). La correlación entre EA y la precipitación en abril fue intensa y significativa (Fig. 8). La tendencia de EA en abril fue positiva y significativa (Tabla 4). En cambio, no sería posible asociar a EA con el incremento de la precipitación en septiembre. Mientras, la tendencia de WeMO fue negativa y significativa en septiembre, y mostró alta correlación con la precipitación (Tabla 2) y los días lluviosos (Tabla 3); pero no sería posible asociar el cambio de la precipitación en abril con la tendencia en WeMO. Mariotti et al. (2002) encontraron similares resultados sobre la relación entre ENSO-NINO y la precipitación en el área mediterránea. Por el contrario, la magnitud de la correlación cuantificada en este estudio entre EA y WeMO, y la precipitación en la DHS en abril y septiembre, difiere de los resultados mostrados por Ríos-Cornejo et al. (2015), probablemente debido a la menor resolución de los datos que utilizaron. En cuanto a junio, único mes en el que la precipitación media de la DHS disminuyó significativamente (Fig. 4), y la tendencia de los días de lluvia también tuvo la mayor magnitud (Fig. 7), destacó el papel de SCAND y EA (Fig. 8).

4. CONCLUSIONES

En el orden que se presentan los resultados, se detallan las conclusiones del análisis de la variabilidad espaciotemporal de las precipitaciones. Solo en junio la tendencia de la precipitación media fue significativa (negativa). El cambio de la precipitación mensual media destacó en abril (negativo) y septiembre (positivo) para todo el territorio de la DHS, mientras que localmente hubo incrementos en

febrero, marzo, septiembre y noviembre, y descensos en el resto. La precipitación media se redujo en cabecera en casi todos los meses, también en invierno que son los meses húmedos. La tendencia de la precipitación mensual fue generalmente negativa en abril y junio, también negativa en octubre (mes más húmedo en amplias áreas de la DHS durante 1951-1984) y en diciembre en la cabecera (mes más húmedo en cabecera), y septiembre tuvo tendencia positiva en todo el territorio. Similares conclusiones destacaron en el estudio de la tendencia mensual de los días lluviosos, que fue negativa e la mayor parte del territorio en todos los meses. La precipitación media en septiembre se incrementó, con menos días de lluvia, lo que sugiere un incremento de la precipitación diaria media. Además, para establecer relaciones entre la dinámica de larga escala y la variabilidad de las precipitaciones, 12 patrones de teleconexión fueron estudiados. Se correlacionaron mensualmente con la precipitación y con los días lluviosos. Ambos resultados mostraron relaciones similares, aunque las correlaciones fueron más intensas con los días lluviosos. La tendencia de los patrones de teleconexión fue significativa en numerosos meses-patrones. Se establecieron relaciones entre NAO y el descenso de la precipitación en diciembre y marzo, entre SCAND y el descenso de la precipitación en junio, y, con cierta incertidumbre, entre ENSO-NINO y los cambios de la precipitación en abril (negativo) y septiembre (positivo). WeMO también fue asociado a cambios en la precipitación invernal excepto en la cabecera, y en septiembre; y EA con la variabilidad de la precipitación en abril. Estudiar mejor estas relaciones, así como la conexión entre ENSO-NINO y algunas teleconexiones europeas puede ser objetivo de estudio en futuros trabajos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a AEMET la creación y publicación de la base de datos “Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos”, disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=2

REFERENCIAS

- AEMET (2019). *Agencia Estatal de Meteorología*. http://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/NT_24_AEMET
- Aldaya, M. M., Custodio, E., Llamas, R., Fernández, M. F., García, J., & Ródenas, M. Á. (2019). An academic analysis with recommendations for water management and planning at the basin scale: A review of water planning in the Segura River Basin. *Science of The Total Environment*, 662, 755-768.
- Camarasa-Belmonte, A. M., Rubio, M., & Salas, J. (2020). Rainfall events and climate change in Mediterranean environments: an alarming shift from resource to risk in Eastern Spain. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 1-23.
- CHS (2020). *Confederación Hidrográfica del Segura*. https://www.chsegura.es/chs/cuenca/resumendedatosbasicos/ambitoterritorial/
- CRU-MOI (2020). Climatic Research Unit. Mediterranean Oscillation Indices. https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/moi/
- EEA (2017). European Environment Agency https://www.eea.europa.eu/highlights/climate-change-poses-increasingly-severe
- Gómez-Martínez, G., Pérez-Martín, M. A., Estrela-Monreal, T. & del-Amo, P. (2018). North Atlantic oscillation as a cause of the hydrological changes in the Mediterranean (Júcar River, Spain). *Water Resources Management*, 32(8), 2717-2734.
- KNMI Climate Explorer. (2020). https://climexp.knmi.nl/start.cgi
- Mariotti, A., Zeng, N. & Lau, K. M. (2002). Euro-Mediterranean rainfall and ENSO—a seasonally varying relationship. *Geophysical research letters*, 29(12), 59-1.

- Martin-Vide, J. & Lopez-Bustins, J. A. (2006). The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(11), 1455-1475.
- Miró, J. J., Estrela, M. J., Caselles, V. & Gómez, I. (2018). Spatial and temporal rainfall changes in the Júcar and Segura basins (1955–2016): Fine-scale trends. *International Journal of Climatology*, 38(13), 4699-4722.
- Ríos-Cornejo, D., Penas, Á., Álvarez-Esteban, R. & del Río, S. (2015). Links between teleconnection patterns and precipitation in Spain. *Atmospheric Research*, 156, 14-28.
- Schulzweida, Uwe. (2019). *CDO User Guide* (Version 1.9.8). http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275
- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. & Esteban-Parra, M. J. (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*: *A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(8), 925-944.
- Van Oldenborgh, G. J., te Raa, L. A., Dijkstra, H. A. & Philip, S. Y. (2009). Frequency- or amplitude-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, 5, 293-301.

LOS BARRANCOS DE LA SIERRA DE ORIHUELA EN LAS INUNDACIONES DEL BAJO SEGURA: EL CASO DE LA RAMBLA DE BONANZA

Estela García Botella
estela.garcia@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-0131-3282

Antonio Prieto Cerdán
a.prieto@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-6086-6290

Juan Antonio Marco Molina
ja.marco@ua.es
http://orcid.org/0000-0003-3431-0499

Pablo Giménez Font
pablo.gimenez@ua.es
http://orcid.org/0000-0002-1171-715X

Ascensión Padilla Blanco
ma.padilla@ua.es
http://orcid.org/0000-0001-9420-9136

Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Alicante, España

RESUMEN

La comarca del Bajo Segura es conocida por las inundaciones periódicas provocadas por las crecidas del río Segura en episodios de lluvias torrenciales desde épocas históricas. Las constancias documentadas datan del siglo XIII, pero en las últimas situaciones de desbordamientos en el siglo XXI, especialmente, en septiembre de 2019, se registraron precipitaciones superiores a los 500 mm en apenas cuatro días en el observatorio del Raiguero de Poniente, en el piedemonte meridional de la Sierra de Orihuela. Estos aguaceros tan localizados activaron rápidamente los barrancos que vehicularon las aguas de escorrentía a través de cuencas pequeñas y anastomosadas, con cursos de corto recorrido que se entrelazan con facilidad cuando se acumulan los picos de crecida. La situación se agrava debido a la intensa ocupación humana de estos glacis en el último medio siglo, tanto con transformaciones agrícolas intensivas como por la ocupación y desvío de los cauces por edificaciones. En este sentido, la gestión urbanística municipal debe tender a evitar que continue el proceso de urbanización e impermebilización de los raigueros, además de tratar de recuperar los cauces ocupados y desviados, mediante soluciones basadas en la naturaleza que faciliten la naturalización de estos colectores, asegurando su conectividad y funcionalidad ecológica.

1. LA INFLUENCIA DE LOS BARRANCOS MERIDIONALES DE LA SIERRA DE ORIHUELA EN LAS INUNDACIONES DEL SIGLO XXI

La comarca del Bajo Segura es conocida, tradicionalmente, por las inundaciones provocadas por las recurrentes crecidas del río Segura que anegan todas las tierras de huerta entre Beniel y Guardamar, de las que se tienen constancias históricas documentadas desde el siglo XIII (CHS). En el siglo XXI han sido dos los episodios que han afectado especialmente a la Vega Baja: en 2016, cuando hubo desbordamientos puntuales en el municipio de Orihuela, registrándose hasta 178 mm acumulados en la estación meteorológica de Almoradí entre el viernes 16 y el lunes 19 diciembre (IVIA); y en 2019, con intensas precipitaciones asociadas a una gota fría o Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), con un registro de 257 mm para el jueves 12 de septiembre en el observatorio de la ciudad de Orihuela, alcanzándose los 502,6 mm acumulados entre los días 10 y 16 de septiembre en el observatorio del Rincón de Bonanza, situado en la pedanía oriolana del Raiguero de Poniente, a unos 6 km de distancia de la ciudad, en el piedemonte meridional de la Sierra de Orihuela (AVAMET).

En este último evento, el escenario más desfavorable se produjo los días 12 y 13 de septiembre, cuando se concentró la descarga de lluvia de forma singular al sur de la Sierra de Orihuela. Fueron dos registros consecutivos con intensidad torrencial: la primera entre las 11 y las 13 horas del jueves 12, con 184,4 mm, y la segunda, entre las 7 y las 10 horas del viernes 13, con 191 mm. El observatorio de la red SAIH de la Confederación Hidrográfica del Segura en la ciudad de Orihuela registró 521,6 mm en todo el episodio (Biener y Prieto, 2019).

Esta inusual concentración de precipitaciones de alta intensidad horaria provocó la rápida escorrentía de las aguas en la vertiente sur de la Sierra de Orihuela, entrando en funcionamiento todos los barrancos entre el Monte de San Miguel y Santomera, ya en la Región de Murcia. En efecto, en el municipio oriolano, entre el Collado del Oriolet y el Raiguero de Poniente se contabilizan hasta 25 colectores hídricos que descienden bruscamente desde las cumbres de la sierra, que se levanta hasta los 634 m de altitud en las inmediaciones de La Naveta, sobre el paraje de la Leja de Millamón, hasta llegar a la cota de los 28 m de altitud en la que se sitúa el trazado de la carretera N-340, que supone un espacio de transición entre abanicos aluviales de los barrancos y el inicio de la llanura inundable del río Segura, a partir del Brazal de Bonanza, que va bordeando ligeramente por encima de la cota 25 metros de altitud.

Históricamente, estos glacis han estado ocupados por diversos núcleos pedáneos, como son los casos del Raiguero de Bonanza, el Raiguero de Levante (o de Arriba), La Aparecida y el Raiguero de Poniente (o de Abajo). De hecho, el Diccionari Normatiu Valencià de la Acadèmia Valenciana de la Llengua, recoge la palabra *"raiguer"* con dos acepciones:

> *1.m. Part més baixa d'una muntanya, on comença la pujada.*
> *2.m. Glacis*

Así pues, los topónimos de las pedanías oriolanas que orlan el piedemonte de la sierra, son un fiel reflejo de sus características geomorfológicas, asentadas sobre glacis, es decir, superficies de erosión ligeramente inclinadas hacia el sur, desarrolladas sobre un sustrato rocoso poco resistente en ambientes áridos o semiáridos como es el caso de la comarca del Bajo Segura (Colomer i Franquesa, 2003)

Antrópico	Superficie (m^2)
Residencial: núcleo urbano	37.024
Residencial: ensanche	238.546
Residencial: discontinuo	143.141
Cementerio	25.004
Industrial	140.983
Red Viaria	28.337
Agrícolas	**Superficie (m^2)**
Frutales	467.569
Naturales	**Superficie (m^2)**
Coniferas	923.332
Pastizal	1.194.023
Combinació cultivos-vegetación	52.230

Tabla 1. Usos de suelo del Rincón de Bonanza, al norte de la carretera N-340.
Fuente: SIOSE, 2015. Elaboración propia.

La fotografía área del vuelo de 1956-57 (americano serie B), con una resolución de 50 cm, refleja que la ocupación de estos glacis con edificaciones se concentraba, de este a oeste, en las agrupaciones de viviendas unifamiliares de las pedanías de:

- Cementerio Nuestro Padre Jesús de Orihuela, entre los barrancos de los Calderones y d las Peñica, al este y oeste, respectivamente.
- Raiguero de Bonanza, encajada entre los cauces de los barrancos de Tines y de los Hoyos, al noreste, y el barranco de los Covachones al suroeste.
- Raiguero de Levante, entre los barrancos de la Muda y de los Muertos, por el este y el oeste, que tienen sus cabeceras en el paraje de Los Negros, a 581 metros de altitud.
- La Aparecida, al oeste del cauce del barranco del Cementerio, que desciende desde los 307 metros de altitud de la Cresta del Gallo, hasta la cota de 28 metros de la actual cirvunvalación de la carretera N-340.
- Raiguero de Poniente, entre los barrancos de Sanes y de Castilla, al este y al oeste, ya en el límite con la Región de Murcia; pero atravesado por los barrancos de Caralo y de la Higuera Verdal.

Sin embargo, como se puede apreciar en la ortofotografía del año 2019 del Institut Cartogràfic Valencià (ICV) que aparece en la figura 4 (con una resolución de 25 cm), en la actualidad, ha sufrido una profunda transformación y los usos de suelo antrópicos han crecido de forma considerable en el caso de estudio del Rincón de Bonanza, tal y como se puede apreciar en la Tabla 1 en la que se reflejan las superficies.

2. EL PLANEAMIENTO URBANÍSTICO Y EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DEL PIEDEMONTE MERIDIONAL DE LA SIERRA DE ORIHUELA

El municipio de Orihuela ha aprobado dos planes generales: el primero en 1959 y el segundo en 1990, que es el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) vigente en la actualidad. Con posterioridad,

en el año 2010, se comenzó la tramitación de un nuevo documento de planeamiento general que, en 2013, obtuvo documento de referencia de la Comisión de Evaluación Ambiental de la Generalitat Valenciana, pero que sufrió una serie de avatares políticos que acabaron con la caducidad de dicho documento de referencia en 2018 por la propia Generalitat, al incumplirse las sucesivas prórrogas concedidas al amparo de la disposición transitoria duodécima de la Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje de la Comunitat Valenciana (LOTUP).

En el primer Plan General de 1959 no se consideraba el papel desarticulador del río ni se tenía en cuenta la armonización de los bordes urbanos de los márgenes del río del cauce, zonas especialmente sensibles en las periódicas situaciones de desbordamientos (Vera Rebollo, 1989). En el PGOU de 1990 se vuelve a repetir esta circunstancia y el río Segura tan sólo aparece citado en la Memoria en referencia a *"...la pestilencia que emana..."* para situarlo únicamente como Sistema General Hidráulico, aunque sólo para destacar la imperiosa necesidad de realizar las obras de infraestructura que eviten los efectos de las riadas *"...y que lo conviertan en su tramo urbano en un elemento significativo que motive atracción y no el rechazo actual por su aspecto degradado e insalubre"*.

Desde los barrios de San Francisco y Ciudad Jardín, clasificados como suelos urbanos de la propia ciudad de Orihuela, de este a oeste, el segundo PGOU de 1990 clasifica como suelos urbanos o urbanizables el Cementerio Nuestro Padre Jesús (y su ampliación), propiedad de la Catedral de San Salvador, como Sistema General; y, colindante al mismo, se clasifica como uelo urbanizable no programado el PAU-13, como suelo industrial parcialmente ocupado. Hacia el oeste se sitúan los suelos urbanos consolidados del Rincón de Bonanza, que ya se expande al sur de la carretera N-340, Raiguero de Levante, La Aparecida y Raiguero de Poniente.

En general, la tipología edificatoria predominante en estas pedanías es la de vivienda unifamiliar adosada, generalmente con patio trasero y con una altura de 1 ó 2 planteas. Sin embargo, en las zonas más antiguas destacan las viviendas aisladas, con una pequeña parcela que, en origen, fueron pequeños huertos y, actualmente, se han transformado en zonas ajardinadas en la mayoría de los casos.

De esta forma, en el PGOU de 1990 se clasifican suelos urbanos residenciales en las citadas pedanías con una superficie total de 97,66 ha, a las que hay que sumar otras 14,15 ha de tres sectores de suelo urbanizable programado y un tercer sector con 9,05 ha que se clasificó como suelo urbanizable a través de la modificación puntual nº 19 del PGOU. Todos estos suelos suman un total de 120,86 ha se suelos residenciales en el piedemonte meridional de la Sierra de Orihuela, con un potencial teórico de más de 10.000 habitantes.

Sectores residenciales	Superficie	Clasificación	Instrumento
Rincón de Bonanza	26,13	Suelo Urbano	PGOU 1990
La Aparecida	13,59	Suelo Urbano	PGOU 1990
Raiguero de Levante	18,40	Suelo Urbano	PGOU 1990
Raiguero de Poniente	24,24	Suelo Urbano	PGOU 1990
PERI El Secano	15,30	Suelo Urbano	PGOU 1990
X2 Ampliación El Secano	8,20	Suelo Urbanizable	PGOU 1990
W1 Raiguero de Bonanza	5,95	Suelo Urbanizable	PGOU 1990
PAU15 La Aparecida	9,05	Suelo Urbanizable	MP nº 19

Tabla 2. Sectores residenciales en el piedemonte meridional de la Sierra de Oribuela. Fuente: Ayuntamiento de Orihuela. Elaboración propia.

A estos siete sectores de suelo residencial, se suma dos sector industriales con un total de 30,83 ha

que, a pesar de estar clasificados en el PGOU de 1990, no disponen de instrumento de planeamiento para su desarrollo, por lo que las industrias existentes se encuentran en un estado irregular, desde el punto de vista urbanístico.

Sectores residenciales	Superficie	Clasificación	Instrumento
PAU13	14,83	Suelo Urbanizable	PGOU 1990
PAU24 La Aparecida	16,00	Suelo Urbanizable	PGOU 1990

Tabla 3. Sectores industriales en el piedemonte meridional de la Sierra de Oribuela. Fuente: Ayuntamiento de Orihuela. Elaboración propia

En este punto es fundamental señalar la desigual gestión urbanística que el Ayuntamiento de Orihuela ha hecho durante décadas, más preocupado por alentar el crecimiento inmobiliario en la costa, vinculado inicialmente al turismo y que, actualmente, se compone de una serie de urbanizaciones con una estructura territorial desigual, donde hay una población de residentes españoles y extranjeros que supone, aproximadamente, un tercio del total de los habitantes del municipio. Por el contrario, se ha desatendido sistemáticamente la elaboración, tramitación y aprobación de los instrumentos de planeamiento de las pedanías, que suponen otro tercio de la población municipal repartida en 27 núcleos urbanos. Este problema se agudiza en las pedanías del piedemonte meridional de la Sierra de Orihuela, que han crecido al amparo de los sectores urbanos residenciales ya clasificados en el PGOU de 1990, sin tener redactados ni aprobados sus correspondientes planes de reforma interior.

3. ESTUDIO DE CASO: LA RAMBLA DE BONANZA

La cuenca de la rambla de Bonanza se localiza en el sector central de la vertiente meridional de la Sierra de Orihuela, entre el polígono industrial del Rincón de Bonanza y el cementerio de Orihuela, al este, y el núcleo urbano de la pedanía del Raiguero de Bonanza, al oeste; y queda delimitada por el arco que se conforma entre el Cabezo de la Zorra y los Bancos de San Cristóbal, quedando la rambla de Bonanza como colector hídrico principal y los barrancos del Asegador y de San Cristóbal como tributarios por el oeste, desaguando en el paraje conocido como El Badén de Bonanza, una vez que cruza la carretera N-340, encajado entre industrias y viviendas.

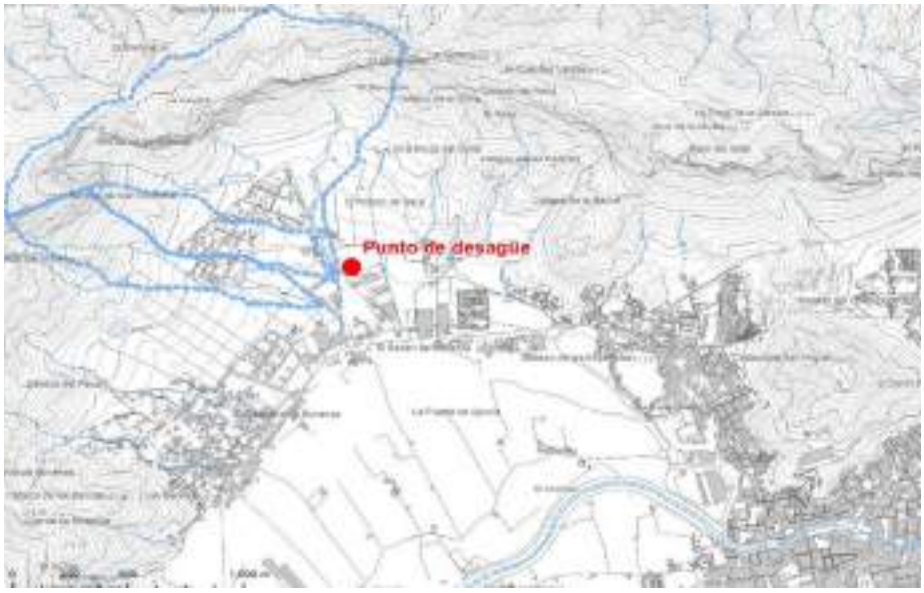


Figura 1. Cuenca de la rambla de Bonanza. Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Parte final del barranco de San Cristobal antes de unirse a la rambla de Bonanza, a su paso entre el Colegio Diocesano "San José Obrero" y campos de cultivos de cítricos. Se observa el cauce confinado entre dos muros. Fuente: elaboración propia.

El contexto geológico general en el que se localiza este territorio es el ambiente morfodinámico denominado Zona Meridional, englobando la depresión cuaternaria del río Segura y zona de suaves relieves terciarios. Dentro de este ambiente, la cuenca de la rambla de Bonanza se enmarca en el subambiente de Llanura del Segura-Campo de Elche, constituida por depósitos cuaternarios indiferenciados sobre los que destacan las sierras de Orihuela y Callosa de Segura, generandose un acusado contraste topográfico entre ese sistema morfodinámico aluvial de cotas bajas y el acusado relieve de dichas sierras aisladas (Estévez et al., 2005).

En un contexto geomorfológico más concreto, es una formación de tipo abanico fluvial o cono de deyección, que constituye una de las formas de contacto desde la Sierra de Orihuela con la Fosa Intrabética, que ofrecen una solución de continuidad entre los relieves de gran turgencia con pendientes muy acusadas de los horsts de las sierras del Orihuela y Callosa de Segura y la zona deprimida (Marco y Matarredona, 2006). Esta morfología lleva implicito un riesgo considerable ya que los torrentes, que se activan con precipitaciones de alta intensidad, descienden bruscamente desde cotas que superan los 490 metros de altitud hasta la cuenca neogéna del río Segura.

En cualquier caso, se trata de un área de transición geológica y morfológica, donde juega un papel fundamental el comportamiento fluvial de laderas que caracteriza esos entornos montañosos y que queda fuertemente condicionado por las características edáficas, litológicas, las acusadas pendientes y por el recubrimiento y composición vegetal en estos ámbitos, a lo que habría que sumar las características climáticas. Este hecho conlleva una fisiografía con un relieve de laderas acentuadas en las cabeceras de los colectores que drenan las elevaciones que rodean los raigueros localizados en una banda de laderas suaves, con unas pendientes generales cercanas al 7-12 %.

3.1. Dinámica del abanico aluvial

En la siguiente imagen de la zona de estudio, perteneciente al vuelo de Ruiz de Alda de 1929, se aprecian esos pequeños ramblizos o raigueros que descienden por el piedemonte de la sierra hasta zonas con menor pendiente, donde se han ido depositando los materiales. El desarrollo de estas morfoestructuras, típicamente mediterráneas, provoca el continuo zapamiento lateral debido al proceso de avulsión al que son continuamente sometidos.

Este proceso lleva consigo un proceso de gradación que provoca que los cauces activos estén a mayor cota que las zonas colindantes, condicionando su estabilidad. Así, se produce una continua colmatación de cauces por los sedimentos arrastrados aguas arriba y depositados aguas abajo, favoreciendo la creación de nuevos cauces en niveles más bajos (Harvey, 1978).

De esta forma, se va dibujando una red fluvial densa que se va encajando en los materiales blandos del piedemonte de la Sierra de Orihuela y, cuando la pendiente es mínima y la capacidad de arrastre se ve reducida, se depositan los materiales formando abanicos aluviales. Al final de su corto trazado, cuando llegan a la zona llana de la vega del Segura y, al no tener la suficiente fuerza, depositan esos materiales formando pequeños conos fluviales o zonas de derrame que no llegan a cruzar la actual carretera N-340, que actúa como barrera.

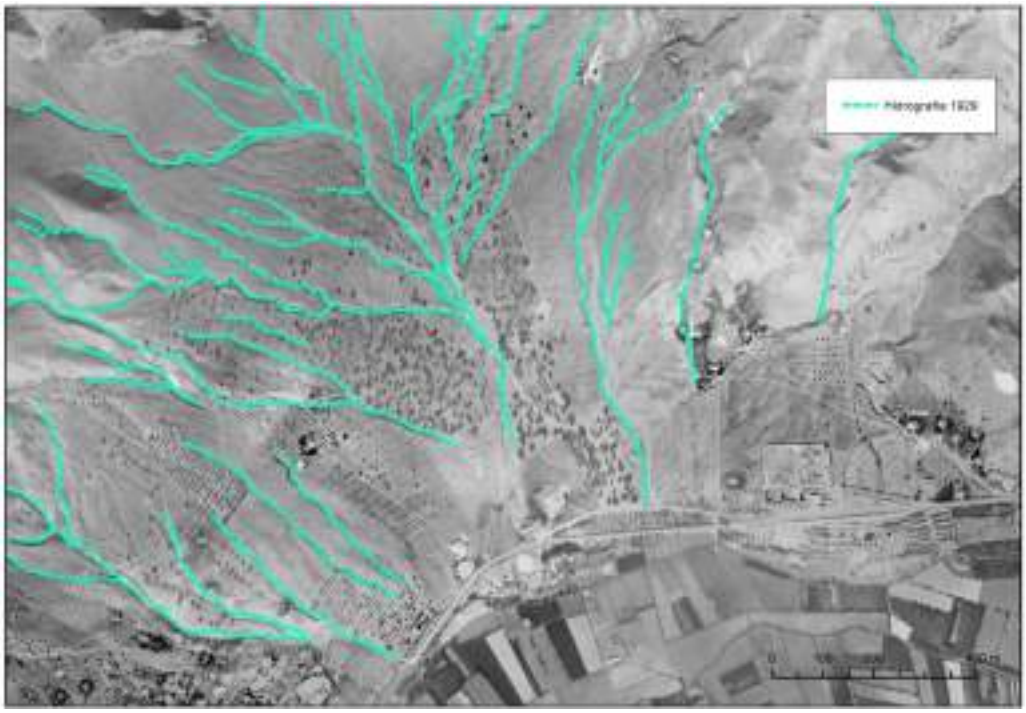


Figura 3. Fotografía aérea del Rincon de Bonanza del vuelo de Ruiz de Alda, 1929. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.

La gran inestabilidad de este sector deriva de la presencia de los tres canales mencionados, que se fueron encajando en sus propios sedimentos y donde predominaban las corrientes de derrubios por la cercanía de la sierra o los sedimentos más finos. Por lo que, de forma combinada, se puede encontrar una predominancia de coluviones de gran tamaño en la zona proximal, mientras que los sedimentos fluviales más finos en localizan en la zona distal. La influencia de la tectónica de la sierra reside, principalmente, en la propia cuenca de alimentación de esos tres colectores, caracterizada por su carácter estructural por un reducido tamaño y acusada pendiente que favorece la generación y crecimiento del área del abanico aluvial y la consolidación de una serie de raigueros encajados en los materiales más blandos por el proceso de avulsión (Giménez Font, 2006).

3.2. Ocupación y transformación del abanico aluvial

En la Figura 3 se pueden apreciar las áreas entre los cauces, formadas por los depósitos de ladera, que se han ido ocupando por tierras de cultivo, tradicionalmente de secano, mientras que las viviendas se situaban a lo largo del antigui camino que unía Alicante y Murcia, que es la actual carretera N-340. Sin embargo, para poder realizar una caracterización completa de este ámbito, a las características naturales descritas, hay que sumar la profunda transformación que han sufrido este abanico aluvial por un desordenado desarrollo urbano.

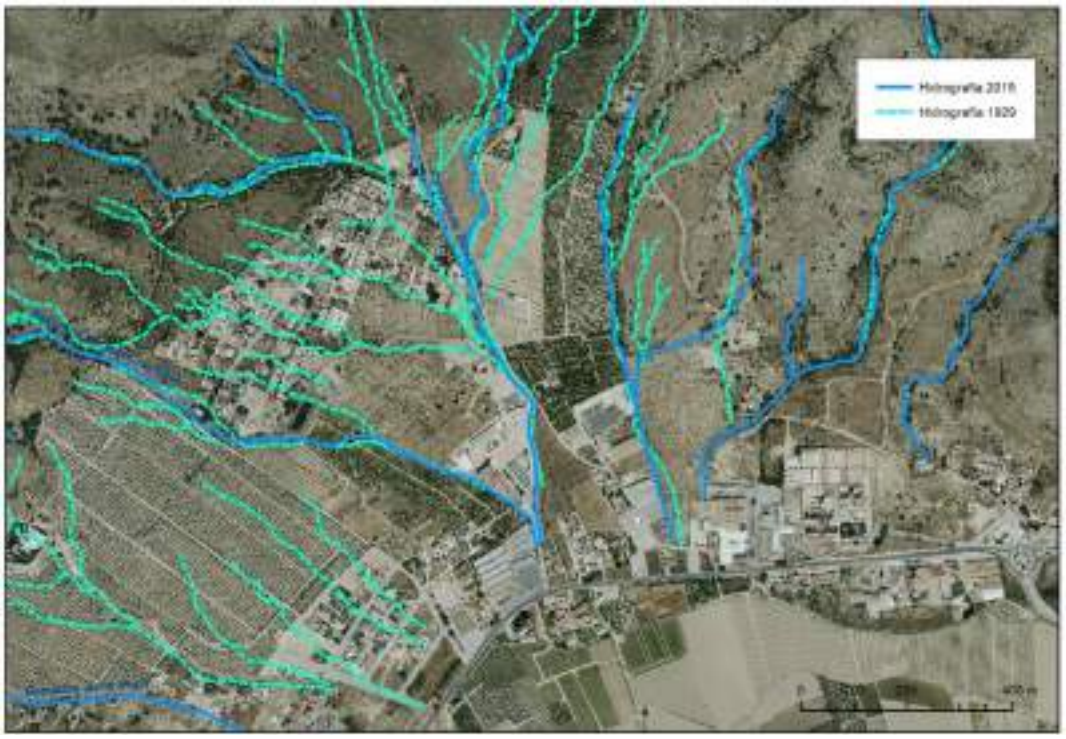


Figura 4. Imagen de la red de drenaje de 1929 y 2015 (cartografia BCV05 2015) del Rincon de Bonanza sobre la ortofoto de 2019. Fuente: IDEV.

Como se puede apreciar en la evolución de los usos de suelo que refleja la secuencia de ortofotografías de las figuras 3 y 4 (correspondientes al vuelo de Ruiz de Alda de 1929 y la ortofoto de 2019), las transformaciones no se han limitado al paso de un uso agrícola tradicional a uno intensivo; sino que se ha ocupado una considerable superficie del Rincón de Bonanza con otros usos como naves industriales, parcelaciones residenciales, centros educativos o usos dotacionales en todo el paraje, no limitándose al entorno de la carretera N-340. Este crecimiento constructivo no sólo conlleva la impermeabilización de la superficie del abanico, sino también la fijación de los antiguos canales de incisión, la desaparición de los raigueros y la destrucción de la dinámica natural. Todos estos factores provocan la desnaturalización del cauce y la aparición de obstáculos físicos. Esta peligrosa combinación de actuaciones, que denota un claro desconocimiento de las características naturales, las convierte en elementos vulnerables que, por su grado de exposición, permite la creación y acentuación de un espacio de riesgo.

Además, la transformación en los usos de suelo y la profunda antropización realizada en una zona tan dinámica que, durante mucho tiempo, ha actuado como fuente de aporte de materiales al llano aluvial del río Segura, mediante los procesos de erosión, transporte y deposición, ha acabado fragmentando e interrumpiendo este intercambio, tras la construcción de la carretera N-340.

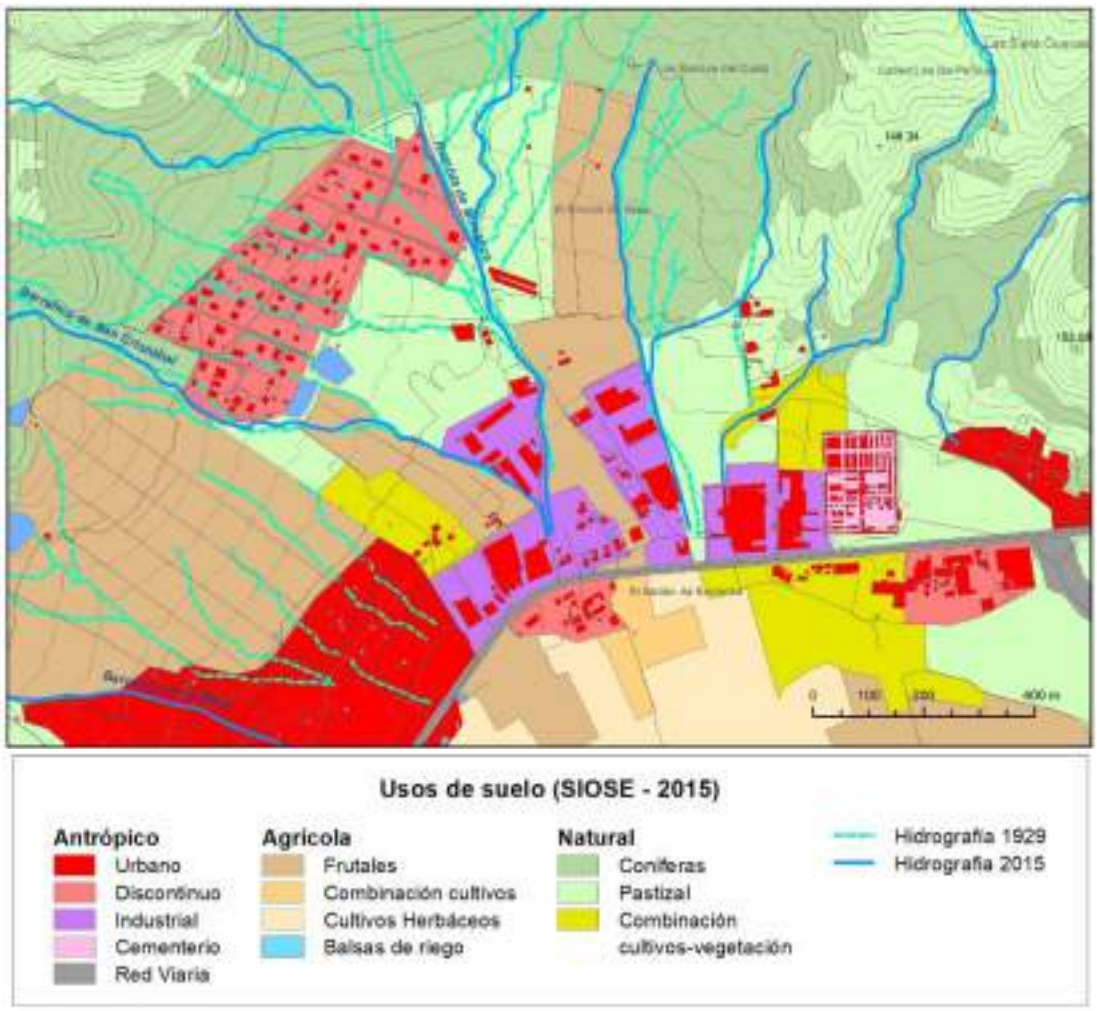


Figura 5. Usos de suelo del SIOSE 2015 con las redes hidrográficas de 1929 y 2015. Fuente: SIOSE 2015, IDEV. Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Las causas de las crecidas del río Segura han sido siempre climáticas, favorecidas por las especiales peculiaridades de la cuenca hidrográfica. En el caso de su red de drenaje secundaria se ven acentuadas por singularidades orográficas locales, como sucede con la vertiente meridional de la Sierra de Orihuela. Estos barrancos pueden llegar a colapsar el llano de inundación entre Beniel y Orihuela en episodios de preciptaciones torrenciales, que asolan todo a su paso, cuando descienden brúscamente desde las elevaciones de rocas carbonatadas triásicas hasta los materiales cuaternarios de la llanura aluvial.

Los daños provocados por las aguas de arroyada en los reiterativos episodios de lluvias torrenciales suelen estar directamente relacionados con la ocupación indebida de los lechos de vaguadas y barranqueras, mediante transformaciones agrarias y edificaciones de muy diversas índole, desde naves industriales y almacenes agropecuarios hasta viviendas de primera o segunda residencia, pasando por dotaciones y equipamientos públicos o privados (centros de enseñanza, sanitarios, administrativos, cementerios, etc.) o por la construcción de obras de infraestructuras sin los drenajes o dimensiones adecuadas (Maurandi y Romero, 2000).

En el particular caso de la rambla de Bonanza, se ha producido un incremento de la

impermeabilización de los suelos que, de agrarios tradicionales en secano, han pasado a regadíos intensivos. Y, de la misma forma, se ha producido la expansión del núcleo urbano de la pedanía del raiguero de Bonanza, así como el desarrollo del nuevo suelo urbanizable de El Secano y la consolidación de las naves industriales asociadas al PAU13, junto a la carretera N-340.

La red de drenaje secundaria de la cuenca vertiente de la rambla de Bonanza ha quedado completamente segmentada e, incluso, desaparecida en buena parte de la margen derecha por la ocupación del sector El Secano. Solamente se mantienen operativos los cauces de la propia rambla de Bonanza y del barranco de San Cristóbal, que han acabado siendo transformados en caminos asfaltados, incrementando aún más la impermeabilización del suelo y, por tanto, la velocidad del agua de arroyada en momento de lluvias torrenciales, colapsando la carretera N-340 y los terrenos de huerta inmediatos. En 2015, según datos obtenidos del SIOSE, los usos de suelo de carácter antrópico ocupaban una superficie cercana a las 70 ha, de las cuales 47,5 (69 %) suponen crecimientos residenciales, fundamentalmente ocupaciones de viviendas unifamiliares aisladas.

La solución pasaría por, en primer lugar, por desclasificar todos los sectores urbanizables en el piedemonte meridional de la Sierra de Orihuela que, por diversos motivos, no se han desarrollado en los treinta años de vigencia del PGOU de 1990. Se trataría de evitar que se continuara incrementando la impermeabilización de los suelos. Y, por otro lado, en la gestión urbanística municipal, sería necesario implementar medidas estructurales fundamentadas en soluciones basadas en la naturaleza para conseguir que los cauces de ramblizos y barranqueras volvieran a ser funcionales, en la medida de lo posible, para tratar de paliar los catastróficos efectos que provocan las repentinas crecidas de estos barrancos en los raigueros oriolanos y en las huertas situadas al sur de la carretera N-340, llegando a colapsar por el posible desbordamiento del río Segura. Así, se aseguraría su conectividad y funcionalidad ecológica entre el llano aluvial y la Sierra de Orihuela, además de contribuir a evitar inundaciones aguas abajo, especialmente en el estrechamiento del cauce del río Segura en la ciudad.

REFERENCIAS

- Associació Valenciana de Meteorologia, AVAMET (2019). *MX MeteoXarxa, episodi de precipitacions des de 10-09-2019 fins a 16-09-2019.* https://www.avamet.org/mx-episodis-meteo.php?id=E083&data=2019-01-01
- Ayuntamiento de Orihuela (1990). *Memoria del PGOU de Orihuela (Alicante).* http://plangeneral.orihuela.es/pg90/memoriasynormas/memoria.pdf
- Biener, S. y Prieto A. (2019). Inundaciones de septiembre de 2019 en la Vega Baja del Segura: causas y consecuencias. *Revista Canelobre*, 70, 31-45. Instituto de Cultura Juan Gil-Albert.
- Colomer, R. y Franquesa, E. (2003). *Diccionari de geografia física*. TERMCAT, centre de terminologia. Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Confederación Hidrográfica del Segura, CHS (2020). *Cronología de las riadas de la cuenca del Segura*. https://www.chsegura.es/chs/informaciongeneral/elorganismo/unpocodehistoria/riadas.html
- Estévez, A. et al. (2005). *Geología de la provincia de Alicante*, Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (12.1), 2-14. *http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/13473*
- Generalitat Valenciana (2005). *Plan de Acción Territorial de la Vega Baja. Documento para exposición al público.* https://www.cma.gva.es/admon/normativa/planes/MEMORIA%20EXP.%20PUBLICO2.pdf
- Generalitat Valenciana (2019). *Plan de Acción Territorial de la Vega Baja del Segura. Borrador del Plan y Documento Inicial Estratégico.* http://politicaterritorial.gva.es/documents/20551069/167230283/01+Borrador+del+Plan+y+Documento+Inicial+Estrat%C3%A9gico/1dfc9293-0fff-4ca2-9664-5e05a0a59ffe

- Giménez Font, P. (2006). Contexto geomorfológico y asentamiento humano: abanicos aluviales y corrientes de derrubios en la Sierra de Callosa (Bajo Segura, Alicante). En: *Guía de campo de las XXI Jornadas de Geografía Física Alacant*, 95-120. AGE, Alicante. http://doi.wiley.com/10.1111/j.1502-3885.2011.00212.x
- Harvey, A. M. (1978). Dissected alluvial fans in southeast Spain. *Catena*, 5(2), 177-211. https://doi.org/10.1016/0341-8162(78)90008-5
- Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, IVIA (2016). *Episodios meteorológicos: lluvias del 16 al 19 de diciembre 2016*. http://riegos.ivia.es/episodios-meteorologicos/lluvias-del-16-al-19-diciembre-2016
- Marco, J. A. y Matarredona Coll, E. (2006). Conjuntos morfoestructurales y elementos del relieve de las comarcas Meridionales valencianas. En: *Guía de campo de las XXI Jornadas de Geografía Física Alacant*, 11-25. AGE, Alicante. http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/12147
- Maurandi Guirado, A. y Romero Díaz, A. (2000). Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo X*X*. *Serie Geográfica*, 9. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=190821
- Ministerio de Industria - IGME (1982). *Mapa geológico de España, E. 1:50.000, serie MAGNA, hoja nº 913-Orihuela*. Servicio de Publicaciones, Madrid. http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0913.pdf
- Vera Rebollo, J. F. (1989). Protección de cauces en el planeamiento urbanístico y la ordenación del territorio: estado de la cuestión a través del caso alicantino. En: A. Gil Olcina y A. Morales Gil, *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo,* 565-574. Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante y Caja de Ahorros del Mediterráneo, Alicante.

INUNDACIÓN POR TSUNAMIS. SIMULACIONES NUMÉRICAS A MUY ALTA RESOLUCIÓN

Carlos Sánchez Linares
Grupo EDANYA, Universidad de Málaga, España
csl@uma.es
https://orcid.org/0000-0002-5493-5982

Alejandro González del Pino
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España. España
Grupo EDANYA, Universidad de Málaga, España
alejandro.gonzalez@igme.es
https://orcid.org/0000-0002-4706-5958

Jorge Macías Sánchez
Grupo EDANYA, Universidad de Málaga, España
jmacias@uma.es
https://orcid.org/0000-0002-3010-8050

RESUMEN

El uso de datos topobatimétricos de alta resolución para la simulación de tsunamis puede proporcionar información relevante sobre el alcance de la inundación provocada por el mismo. Además, la consideración de datos complementarios como el tipo de edificios, la ubicación de infraestructuras esenciales, el tipo de carreteras, aeropuertos, hospitales, etc. permite identificar las zonas más vulnerables, estimar los daños esperados en estas infraestructuras, limitar el área de afectación y evacuación, definir las rutas de evacuación, adaptar los planes de emergencia y evaluar la vulnerabilidad asociada en las diferentes áreas. Para este fin utilizamos el modelo Tsunami-HySEA que implementa en el mismo código las tres fases de un tsunami generado por un terremoto: generación, propagación e inundación. Se implementa en mallas anidadas con diferente resolución y en un entorno GPU, lo que permite realizar simulaciones mucho más rápidas que en tiempo real y alcanzar resoluciones de hasta 1m, permitiendo finalmente elaborar mapas de inundación muy precisos. En este trabajo presentamos los resultados de la simulación numérica de un evento de características parecidas al que tuvo lugar en 1755, estudiando su propagación en mar abierto, su llegada a la costa y su impacto a alta resolución en la ciudad de Cádiz.

1. INTRODUCCIÓN

La historia de la humanidad está salpicada de numerosos episodios catastróficos que han determinado cambios importantes en las ubicaciones de los asentamientos urbanos, así como, migraciones o modificaciones en los usos del territorio. Gran parte de estos episodios tienen su origen en los movimientos sísmicos que suceden en la corteza terrestre y en los procesos que desencadenan. En algunas ocasiones son mayores los desastres originados por los fenómenos que a su vez genera un terremoto que los efectos del propio movimiento sísmico.

Una de las catástrofes más antiguas y mejor documentadas que ilustran este tipo de fenómenos, es la que sucedió en la isla de Thera -actualmente denominada como el archipiélago de Santorini, en el

mar Egeo- alrededor del año 1627 a.C. y que afectó muy seriamente la civilización minoica, con importantes consecuencias en la isla de Creta, núcleo cultural de aquella sociedad. El desplome en la caldera de un volcán, generó un colapso del conjunto montañoso de una magnitud ingente. La precipitación secuenciada sobre la superficie del mar de semejante volumen de rocas y piroclastos, produjo una sucesión de tsunamis que impactaron sobre la costa adyacente en el interior de la bahía, causando la práctica destrucción de cuantas infraestructuras existían en el litoral. El tren de olas generado podría haber alcanzado alturas entre 14 y 18 metros, lo cual supondría que las aguas ascenderían hasta cotas de 50 metros de altura en las zonas acantiladas.

Esta primera referencia de un tsunami tan complejo, nos sitúa en un escenario relacionado con dos posibles fuentes tsunamigénicas: los colapsos o avalanchas de gran cantidad de rocas sobre la superficie del mar, y los terremotos originados en los niveles superiores de la corteza terrestre en regiones marítimas o próximas al mar.

Otros episodios más recientes nos trasladan a Sumatra, Chile y Japón. Quizás el más violento ha sido el tsunami que originó el terremoto de Honshu (11/3/2011) y que sacudió la costa de Japón cebándose particularmente en torno a la ciudad de Fukushima. El seísmo de mayor magnitud, 9 en la escala de Richter, se produjo a las 05:46 horas en un punto localizado a 177 km de la costa, y a 32 km de profundidad en la corteza del archipiélago japonés. El tren de olas que generó el movimiento sísmico alcanzó los 14 metros de altura, desplazándose a gran velocidad y cargándose de sedimentos marinos, lo cual incrementó considerablemente su capacidad destructiva.

Ante la inexorable ocurrencia de este tipo de fenómenos naturales, ha surgido la imperiosa necesidad del ser humano de adaptarse al medio en el que habita, a veces hostil. Esto le ha obligado a tener que comprender los mecanismos que los genera y así poder mitigar sus efectos devastadores. Es precisamente, en este punto, donde los modelos matemáticos juegan un papel determinante y la simulación numérica mediante ordenadores se ha convertido en una herramienta de predicción extremadamente potente y, en ocasiones, precisa.

2. MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DE UN TSUNAMI

2.1. Ecuaciones del modelo

Uno de los modelos más usados en la propagación de tsunamis y su impacto en las zonas costeras es el modelo de aguas someras o también conocido como ecuaciones de *shallow-water*. Para la estimación de la deformación causada por un terremoto se utiliza el modelo de Okada (1985). En este trabajo vamos a suponer que el terremoto se produce en el instante inicial y que la deformación causada por el mismo se transmite en el instante inicial a la superficie del fluido.

Sin querer entrar en muchos detalles técnicos, presentamos a continuación el sistema de ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones y una capa.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial x}(U) + \frac{\partial F_2}{\partial y}(U) = S_1(U)\frac{\partial H}{\partial x} + S_2(U)\frac{\partial H}{\partial y} + S_F(U)$$

donde

$$U = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix}, \quad F_1(U) = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix}, \quad F_2(U) = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix},$$

$$S_1(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ gh \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_2(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ gh \end{pmatrix},$$

$$S_F(U) = \begin{pmatrix} 0 & S_x(U) & S_y(U) \end{pmatrix}^T.$$

En el sistema anterior, h(x, t), denota la altura de la capa de agua en el punto x ∈ D ⊂ $\mathbb{R}^2$ en el instante t, donde D es la proyección horizontal del dominio 3D donde tiene lugar el terremoto y el consiguiente tsunami. H(x) es la profundidad del fondo en el punto x medido desde un nivel de referencia. Introducimos también la función η(x, t) = h(x, t) − H(x) que corresponde a la superficie libre del fluido. Denotamos por q(x, t) = (q_x(x, t), q_y(x, t)) el caudal de agua en el punto x en el instante t. El caudal está relacionado con la velocidad promediada en altura u(x, t) mediante la expresión: q(x, t) = h(x, t)u(x, t).

El término S_F parametriza la fricción entre el fluido y el fondo no erosionable. Nosotros vamos a usar la ley de Manning,

$$\begin{cases} S_x(U) = -gh \dfrac{n^2}{h^{4/3}} u_x \|\boldsymbol{u}\| \\ S_y(U) = -gh \dfrac{n^2}{h^{4/3}} u_y \|\boldsymbol{u}\| \end{cases},$$

donde n > 0 es el coeficiente de Manning.

El modelo de Okada asume que el terremoto se genera por la ruptura de un único plano de falla. Esta rotura de falla se describe por una serie de parámetros físicos que son:

- el largo y el ancho del plano de falla (generalmente medidos en m o km),
- la localización (latitud y longitud) del epicentro,
- la profundidad del hipocentro,
- ángulo de deslizamiento *(strike angle)*, es decir, la orientación del borde superior, medida en grados en el sentido de las agujas del reloj desde el norte y que toma valores entre 0 y 360. El plano de falla se inclina hacia abajo y hacia la derecha cuando se mueve a lo largo del borde superior en la dirección del deslizamiento,
- el ángulo de inmersión *(dip angle)* que es el ángulo en el que el plano se inclina hacia abajo desde el borde superior. Se trata de un ángulo positivo entre 0 y 90 grados,
- el ángulo de inclinación *(rake angle)*, es decir, el ángulo en el plano de falla en el que se produce el deslizamiento, medido en grados en sentido antihorario desde la dirección del deslizamiento y que toma valores entre -180 y 180. Nótese que para un terremoto generado por fallas traslacionales (strike-slip), el ángulo de inclinación está cerca de 0 o de 180 grados.

Para un terremoto por subducción, el ángulo de inclinación es generalmente más cercano a 90 grados, para una falla normal es aprox. −90 y una inversa aprox. 90.

- la distancia de deslizamiento *(slip distance)* es la distancia (generalmente en cm o m) del bloque suspendido que se mueve con relación al bloque en pie, en la dirección especificada por el ángulo de inclinación. El bloque suspendido es el que está encima del plano de falla de inmersión (o a la derecha si se mueve en la dirección de deslizamiento). Siempre es una cantidad positiva.

Este modelo proporciona una aproximación grosera de la deformación de la corteza terrestre, que no está compuesta por un material elástico isotrópico homogéneo, como se supone en este modelo. Sin embargo, es una aproximación razonable para el modelado de tsunamis, puesto que, en general no se conocen exactamente los parámetros de deslizamiento de falla en el momento en el que se produce el tsunami, incluso ni siquiera se conocen con exactitud tiempo después de haberse producido, de ahí el planteamiento de incorporar incertidumbre en los mismos. En la Figura 1 se muestra la relación de los parámetros para el modelo de desplazamiento de Okada.

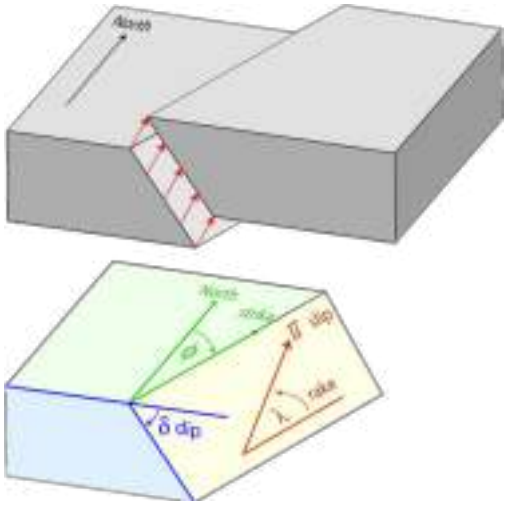


Figura 1. Definición de los ángulos strike, dip y rake para una modelo de rotura de falla. Fuente: http://www.gps.alaska.edu/je/Classes/GEOS655/strike_dip_rake.gif

2.2. Modelo Tsunami-HySEA

Tsunami-HySEA es un modelo numérico diseñado específicamente para simulaciones de tsunami. Combina robustez, fiabilidad y alta precisión en un modelo basado en una implementación de GPU, permitiendo simulaciones más rápidas que en tiempo real (*Faster Than Real Time*). Ha sido ampliamente testado, y en particular ha pasado todos los test en Synolakis et al. (2008), así como otros ejercicios de referencia propuestos. Algunos de ellos se pueden encontrar en Castro et al. (2005, 2006, 2008), Gallardo et al. (2007); Fernández-Nieto y col. (2008); y de la Asunción et al. (2013). Los resultados presentados al MMS / NTHMP para obtener la aprobación para usar el modelo Tsunami-HySEA en estudios de peligro financiados por NTHMP se pueden encontrar en Macías et al. (2017). Entre los casos de referencia se encuentra el del test del *Monai Valley*, uno de los más emblemáticos para los códigos de tsunami, que se presentó en EGU 2013 en Macías et al. (2013a). Una comparación de los resultados numéricos Tsunami-HySEA con el modelo MOST para el escenario LANTEX 2013 y el impacto del tsunami en las costas de Puerto Rico se puede encontrar en Macías et al. (2015b). El modelo Tsunami-HySEA también ha participado en el ejercicio de validación "*NOAA/NTHMP MMS Benchmarking Workshop: Tsunami Currents*" (NTHMP, 2016 y Lynett et al., 2017, comparativa de modelos). Los resultados de la evaluación comparativa para Tsunami-HySEA se pueden encontrar en Macías et al. (2020a, 2020b).

Además de todo esto, se ha hecho un gran esfuerzo por desarrollar un código específico de Tsunami-HySEA adecuado para la simulación de tsunamis en el marco de los Sistemas de Alerta Temprana de Tsunami (TEWS, *Tsunami Early Warning System*). Estos trabajos se presentaron en el EGU 2014 en Macías et al. (2014) y en "Perspectives of GPU Computing in Physics and Astrophysics" en Castro et al. (2014b). La versión TEWS de Tsunami-HySEA es actualmente el código numérico utilizado en el INGV (Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia). También ha sido adoptado por el JRC (Joint Research Center de la Comisión Europea) como uno de los códigos numéricos de su Sistema de Alerta de Desastres Naturales (GDACS) y también ha sido adoptado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) para el Sistema Nacional de Alerta Temprana de tsunamis.

2.3. Metodología

Para evaluar el peligro de tsunami provocado por un terremoto submarino, se propone una línea básica de cinco pasos:

1. En primer lugar, se deben determinar una o varias fuentes sísmicas. Corresponden al peligro o riesgos potenciales que se van a simular. En este trabajo, se considerará un escenario, considerado como el peor de los casos.
2. Dada la geometría del plano de ruptura y los parámetros de movimiento relativo para cada fuente sísmica, se debe evaluar una deformación del fondo marino. Esto se hace usando el modelo Okada (1985). La deformación del fondo marino se usa luego en el siguiente paso.
3. Siempre que se dé una deformación del fondo marino, la perturbación inicial en la superficie del agua se puede evaluar como una transmisión instantánea de la deformación del fondo. Esto establece la condición inicial para el siguiente paso: la propagación de la onda de superficie (el tsunami).
4. Luego se calcula la propagación, por lo que la perturbación de la superficie del agua interactúa con la batimetría y la geometría costera.
5. Finalmente, se calcula la inundación tierra adentro y se devuelven las variables requeridas que describen el impacto costero (altura máxima de agua en la zona inundada, velocidades del flujo, o el propio flujo (h*u), además de otra información importante como tiempos de llegada o altura de ola cerca de la costa.) Estos datos nos servirán para generar mapas de inundación que, junto a los valores de otras variables (y la vulnerabilidad), servirán de entrada para los modelos de estimación.

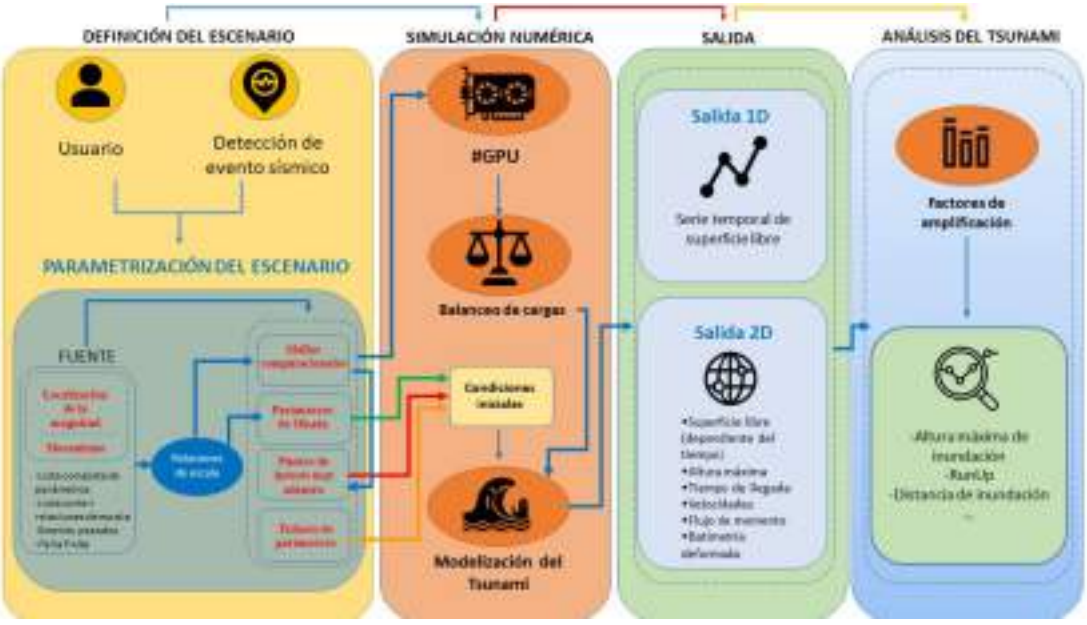


Figura 2. Flujo de trabajo en la simulación numérica de tsunamis.

3. SIMULACIÓN DEL TSUNAMI DE 1755 Y SU IMPACTO EN COSTA

3.1. Fuente del tsunami

El terremoto de Lisboa de 1755, también llamado Gran Terremoto de Lisboa, fue seguido por un tsunami que causó la destrucción casi total de Lisboa. Este tsunami también llegó a la costa española. Como fuente sísmica del tsunami, consideraremos una entre las múltiples fuentes que se han propuesto en la literatura como potencial generadora del evento de tsunami de Lisboa de 1755 (Baptista et al. (1998), Baptista et al. (2000), Baptista et al. (2003), Zitellini et al. (2009), Barkan et al. (2009), Lima et al. (2010), entre otros).

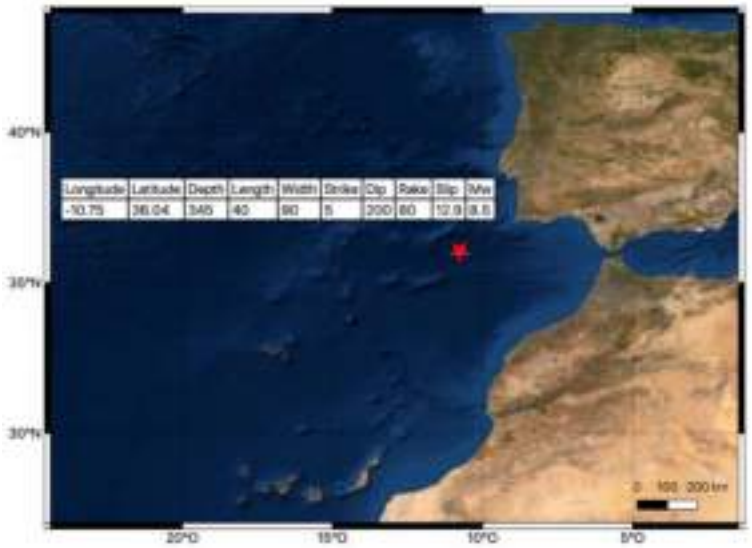


Figura 3. Fuente del escenario de Lisboa 1755. Fuente: de Barkan et al. (2009).

3.2. Datos topobatimétricos y dominio de computación

Para este trabajo, y con el objetivo de alcanzar una resolución en la inundación de en torno de 5m, hemos considerado la unión de tres tipos de datos:

- **Batimetría.**
  Para la construcción de la malla grosera se han usado los datos EMODET (https://www.emodnet-bathymetry.eu/) a una resolución de 225. Para las mallas intermedia y la más fina se ha usado la topobatimetría del Litoral de Cádiz. Ecocartografía del Litoral de la provincia de Cádiz. Año 2012. 1:5.000, facilitada por la Dirección General de Costas. Ministerio de Medio Ambiente.
  (https://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR)
- **Topografía.**
  Para la construcción del modelo topográfico se ha usado el modelo digital de superficies 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m. MDS05.
  (http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp)

La unión de los datos topobatimétricos no está exenta de dificultades como la gestión de zonas solapantes con datos de diferente origen, definición de líneas de costa precisas y la integración consistente de mallas de diferente resolución. En este proceso se lleva a cabo una interpolación para conseguir establecer mallas rectangulares y anidadas que sirvan de input al modelo Tsunami-HySEA.

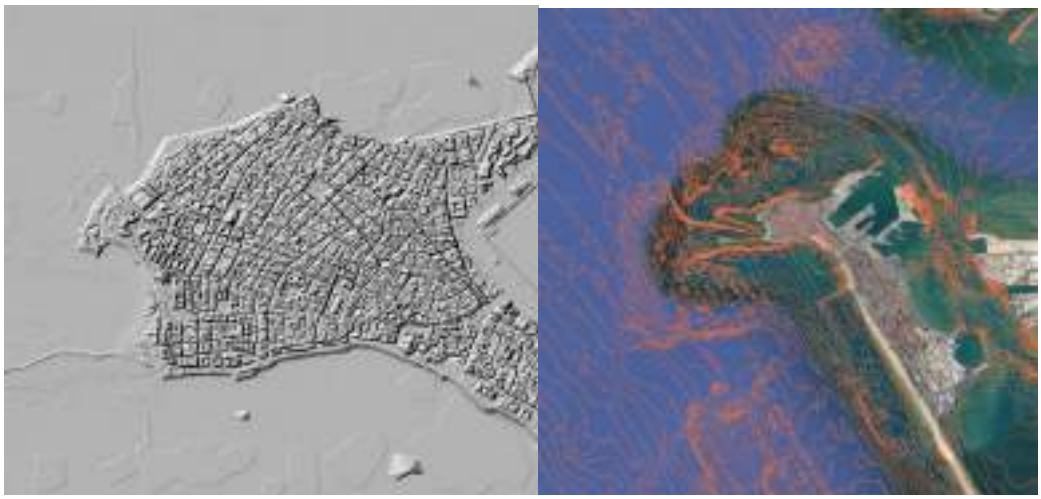


Figura 4. A la izquierda las isobatas que componen la ecocartografía de Cádiz. A la derecha el modelo digital de superficie MDS05 de la Ciudad de Cádiz.

3.3. El modelo de ruptura y la condición inicial

El modelo de Okada es el que generalmente se aplica y se implementa en el código Tsunami-HySEA. Hay otras posibilidades disponibles, como proporcionar al modelo la salida directa de cualquier otro modelo de ruptura para usar como condición inicial. En este caso usaremos los parámetros de Okada dados en la Figura 3.

La aplicación del modelo de Okada a estos parámetros produce la deformación inicial del fondo que se supone que se transmite de forma instantánea a la superficie del mar, produciendo la onda inicial del tsunami, caracterizada por un bipolo con una zona de hundimiento junto a una zona de sobreelevación.

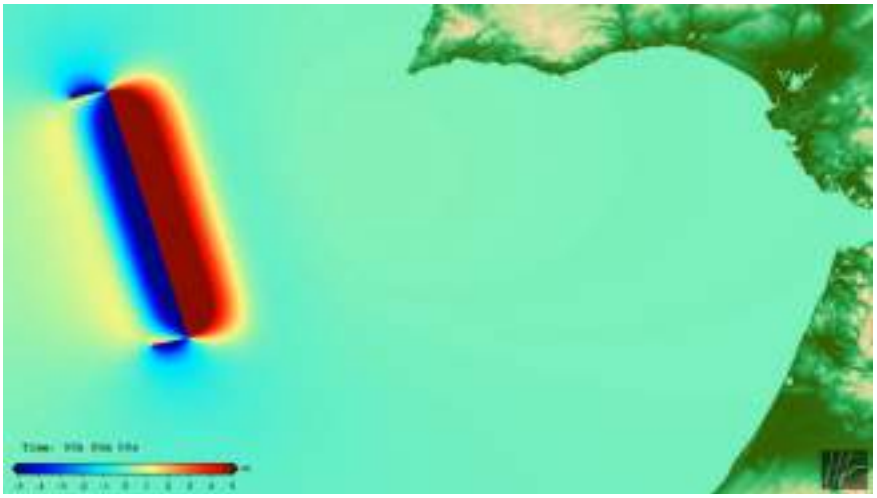


Figura 5. Condición inicial generada a partir de los parámetros de Okada.

3.4. Algoritmo de mallas anidadas

Se usará un exhaustivo proceso de creación de mallas anidadas. Esto representa la metodología más avanzada para la evaluación del peligro de tsunami. El uso de mallas anidadas ha sido ampliamente utilizado como una metodología para aumentar la resolución y el detalle de las simulaciones numéricas. Tsunami-HySEA utiliza esta metodología sin límites en el número de mallas anidadas. La única restricción es que la resolución de cada submalla debe ser una potencia de dos de la resolución

de la malla principal. La contribución adicional de Tsunami-HySEA a esta metodología es el anidamiento bidireccional, es decir, el modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras en cada nivel, pero la salida de cada nivel primario no es solo la entrada del nivel secundario correspondiente, sino que hay una corrección para cada nivel superior por cada una de sus submallas inferiores. Esta metodología de anidamiento bidireccional se ha optimizado de tal manera que mejora la eficiencia de los resultados del modelo sin aumentar significativamente el esfuerzo computacional.

El dominio de cálculo considerado, que puede verse en la Figura 5, se extiende entre [-12.5002, -5.0] en longitud y [34.00792, 37.49983] en latitud. En este trabajo consideraremos tres niveles de mallas anidadas, desde la propagación en mar abierto con una resolución de 240 metros en el nivel más grosero, reduciendo el tamaño de resolución a 30 metros en la resolución intermedia y, finalmente, a 3’5 metros en la zona de inundación de alta resolución. La distribución de las diferentes extensiones de las mallas así como de las resoluciones espaciales tenidas en cuenta, resultan en una malla grosera de 3.600 x 1.760 volúmenes, una malla intermedia de 856 x 864 volúmenes y una malla de alta resolución de 1.056 x 912. En total, esta distribución de mallas anidadas está formada por 7.736.256 de volúmenes para conseguir una resolución de 3’5 m en una zona muy concreta y delimitada de la ciudad de Cádiz.

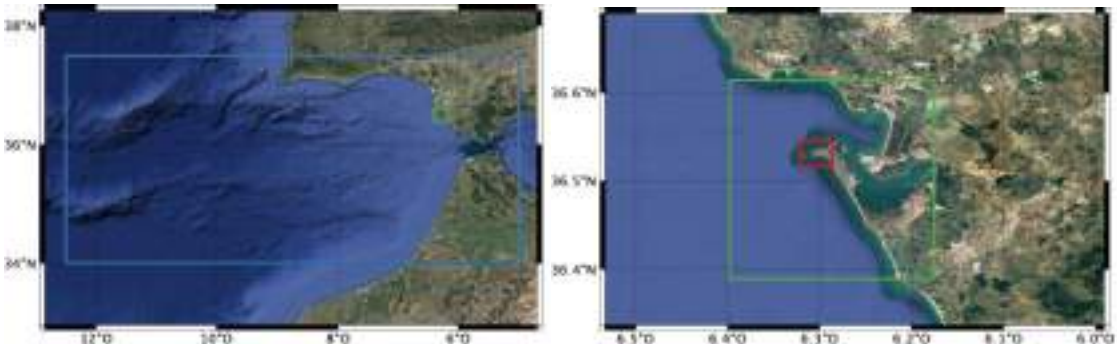


Figura 6. Dominio espacial de cálculo en el que se muestran los tres niveles de submallas utilizados con resoluciones de 240, 30 y 3.5 metros, respectivamente.

3.5. Resultados de la simulación

Las variables que devuelve el modelo consisten en la altura máxima alcanzada en todos los dominios (las diferentes mallas anidadas), así como la velocidad máxima y el flujo de momento máximo (velocidad por la altura del agua) y la aceleración. La simulación de propagación proporcionará además una salida importante a la hora de evaluar inundación así como el tiempo de respuesta. En este caso se han establecido una serie de boyas virtuales a lo largo de la costa de Huelva y Cádiz. Estas series temporales calculadas con Tsunami-HySEA devuelven la altura de ola en dichas boyas a lo largo de toda la franja costera considerada, permitiendo así tener una aproximación detallada de altura y tiempo de llegada.

4. RESULTADOS

Presentamos a continuación los resultados de la simulación numérica que hemos realizado en el dominio anteriormente definido, con las condiciones iniciales ya descritas y haciendo uso del código numérico Tsunami-HySEA. Presentaremos las elevaciones máximas de la onda simulada en todo el dominio, junto con el impacto e inundación en costa, concretamente en la malla fina de alta resolución de la ciudad de Cádiz.

4.1. Propagación

Cuando estudiamos los efectos del tsunami en mar abierto, la elevación máxima nos proporciona una valiosa información sobre la peligrosidad asociada al tsunami y del potencial de inundación de la onda en las distintas zonas de la costa. En la figura 7 presentamos la altura máxima alcanzada en cada uno de los puntos de la malla grosera.

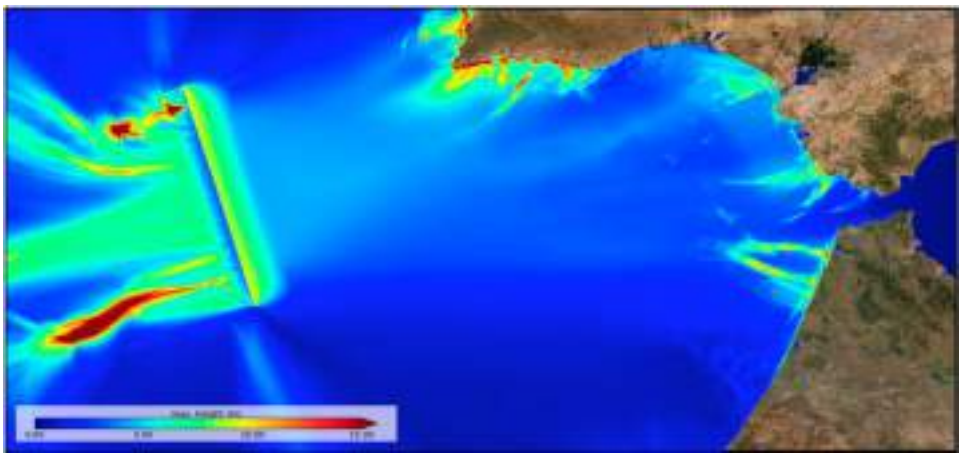


Figura 7. Elevación máxima de la superficie del mar a lo largo de toda la simulación representadas en la malla grosera. Se observan alturas superiores a 15 m.

El hecho de tener datos de mareógrafos situados a lo largo de la costa favorece la recogida de la información real de las alturas de ola registradas. Esto, junto con la simulación numérica de las series temporales en las boyas virtuales, permite anticiparse a los potenciales efectos de inundación en la franja costera. En la figura 8 presentamos las alturas máximas registradas en las boyas virtuales para el caso de estudio, así como un perfil de serie temporal en uno de dichos puntos.



Figura 8. Elevación máxima en las boyas virtuales. Ejemplo de serie temporal en uno de los puntos de interés.

4.2. Inundación

A continuación, presentamos la inundación que produce este evento en una zona muy concreta y a muy alta resolución de la ciudad de Cádiz.



Figura 9. Altura máxima alcanzada y altura de inundación a alta resolución de la ciudad de Cádiz.



Figura 10. Superposición en 3D de la inundación. Vista del Puerto.



Figura 11. Superposición en 3D de la inundación. Detalle de Playa de la Caleta. Se observan espesores de 5 metros en las calles que desembocan en la playa.



Figura 12. **S**uperposición en 3D de la inundación. Detalle del parque Genovés. Se observa cómo la construcción de la Muralla de San Carlos frena el avance de la inundación.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El uso de datos de alta resolución en las zonas costeras es de especial relevancia a la hora de estudiar el impacto en la costa de tsunamis. Este tipo de estudios son esenciales a la hora de planificar e implementar medidas de mitigación y prevención de los efectos devastadores de las inundaciones provocadas por tsunamis. Y en este sentido, el uso de modelos matemáticos nos permite evaluar el impacto de un tsunami, tanto si este ocurrió en el pasado (como se hace en el presente trabajo), así como de posibles tsunamis asociados a potenciales terremotos submarinos sobre los que tenemos indicios científicos de su eventual ocurrencia (simulación de escenarios posibles).

Gracias al avance en las capacidades de supercomputación de las GPU (procesadores de las tarjetas gráficas), una aplicación extremadamente reciente de los modelos numéricos es su utilización en los Sistemas de Alerta Temprana de Tsunamis, cuyo objetivo es reproducir los efectos de un tsunami que se acaba de producir antes de que la onda alcance la zona costera. Además, el uso de datos a alta resolución permite, como queda de manifiesto en este trabajo, la obtención de resultados con muy alta precisión de la simulación del evento en el área de estudio, garantizando una óptima evaluación de los posibles riesgos y vulnerabilidades de la eventual zona afectada. En este contexto podemos mencionar el proyecto GeoMEP Tsunami (véase ponencia de Llorente y otros, en este congreso) para la estimación del impacto económico de potenciales tsunamis en las costas españolas que financia el Consorcio de Compensación de Seguros.

REFERENCIAS

- Asunción, M., Castro, M. J., Fernández-Nieto, E. D., Mantas, J. M., Ortega, S. and González-Vida, J. M. (2013). Efficient GPU implementation of a two waves TVD-WAF method for the two-dimensional onelayer shallow water system on structured meshes. *Computers & Fluids*, 80, 441-452.
- Baptista, M. A., Heitor, S., Miranda, J. M., Miranda, P. M. A. and Mendes Victor, L. (1998). The 1755 Lisbon earthquake; evaluation of the tsunami parameters. *Journal of Geodynamics*, 25, 143-157.
- Baptista, M. A., Miranda, J. M., Matias, L. and Ribeiro, A. (2000). BIGSETS Team. The Thrust of Marques de Pombal, a possible source of the 1755 Lisbon tsunami. In: *XXVII Assembly of the European Seismological Commission*, Lisbon, 10-15.
- Baptista, M.A., Miranda, J. M., Chierici, F. and Zitellini, N. (2003). New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 333-340.
- Barkan, R., Ten Brink, U.S. and Lin, J. (2009). Far field tsunami simulations of the 1755 Lisbon

earthquake: Implications for tsunami hazard to the U.S. East Coast and the Caribbean. *Marine Geology*, 264(1–2), 109-122. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.010.

- Castro, M. J., Chacón, T., Fernández-Nieto, E. D., González-Vida, J. M. and Parés, C. (2008). Well-balanced finite volume schemes for 2D non-homogeneous hyperbolic systems. Applications to the dam break of Aznalcóllar. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 197(45), 3932-3950.
- Castro, M. J., Ferreiro, A., García, J. A., González, J. M., Macías, J., Parés, C. and Vázquez, M. E. (2005). On the numerical treatment of wet/dry fronts in shallow flows: Applications to one-layer and two-layer systems. *Math. Comp. Model*., 42 (3-4), 419-439.
- Castro, M. J., González, J. M. and Parés, C. (2006). Numerical treatment of wet/dry fronts in shallow flows with a modified Roe scheme. *Math. Mod. Meth. App. Sci*., 16(6), 897-931.
- Castro, M. J., González-Vida, J. M., Macías, J., de la Asunción, M., Molinari, I., Melini, D., Romano, F., Tonini, R., Lorito, S. and Piatanesi, A. (2014b). *HySEA-tsunami model: A GPU implementation for the Italian TEWS.* In: *Proceedings of Perspectives of GPU Computing in Physics and Astrophysics*. Rome (Italy), 15-17 September 2014.
- Fernández-Nieto, E. D., Bouchut, F., Bresh, D., Castro, M. J. and Mangeney, A. (2008). A new Savage-Hutter type model for submarine avalanches and generated tsunami. *J. Comp. Phys*., 227, 7720-7754.
- Gallardo, J. M., Parés, C. and Castro, M. (2007). On a well-balanced high-order finite volume scheme for shallow water equations with topography and dry areas. *J. Comp. Phys.,* 227, 574-601.
- Lima, V. V., Miranda, J. M. Baptista, M. A., Catalao, J., González, M., Otero, L., Olabarrieta, M., Álvarez-Gómez, J. A. and Carreno, E. (2010). Impact of a 1755-like tsunami in Huelva, Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 10(1), 139-148.
- Lynett, P. J. et al. (2017). Inter-model analysis of tsunami-induced coastal currents. *Ocean Modeling*, 114,14-32. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.04.003
- Macías, J. (2014). Tsunami Numerical Simulations: HySEA model. A GPU approach to tsunami modeling and case studies. In: *Experts Meeting Workshop on Tsunami Modeling and Mitigation*. Cartagena de Indias (Colombia), 1-3 December, 2014.
- Macías, J., Castro, M. J. and Escalante, C. (2020a). Performance assessment of Tsunami-HySEA model for NTHMP tsunami currents benchmarking. Laboratory data. *Coastal Engineering.*
- Macías, J., Ortega, S., Castro, M. J. and González-Vida, J. M. (2020b). Performance assessment of Tsunami-HySEA model for NTHMP tsunami currents benchmarking. Field cases. Accepted in *Ocean Modelling*, 152, 101645, ISSN 1463-5003. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101645
- Macías, J., Castro, M. J., González-Vida, J. M., de la Asunción, M. and Ortega, S. (2014). HySEA: An operational GPU-based model for Tsunami Early Warning Systems. *EGU.*
- Macías, J., Castro, M. J., González-Vida, J. M. and Ortega, S. (2013a). Non-linear Shallow Water Models for coastal run-up simulations. *EGU.*
- Macías, J., Castro, M. J., Ortega, O., Escalante, C. and González-Vida, J. M. (2017). Performance benchmarking of Tsunami-HySEA model for NTHMP's inundation mapping activities. *Pure and Applied Geophysics*, *1-37*. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1583-1
- Macías, J., Mercado, A., González-Vida, J. M., Ortega, S. and Castro, M. J. (2016). Comparison and numerical performance of Tsunami-HySEA and MOST models for LANTEX 2013 scenario. Impact assessment on Puerto Rico coasts. *Pure and Applied Geophysics*.
- NTHMP, National Tsunami Hazard Mitigation Program (2016). *Report on the 2015 NTHMP Current Modeling Workshop*. Portland, Oregon.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kânoğlu, U. and González, F. I. (2008). Validation and verification of tsunami numerical models. *Pure Appl. Geophys*., 165(11–12), 2197–2228.
- Zitellini, N., Gràcia, E., Matías, L., Terrinha, P., Abreu, M. A., De Alteriis, G., Henriet, J. P., Dañobeitia, J. J., Masson, D. G., Mulder, T., Ramella, R., Somoza, L. and Díez, S. (2009). The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 280, 13-50.

LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ÁMBITOS URBANOS. UN ELEMENTO A TENER EN CUENTA PARA LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

Luis Miguel García Lozano
Departamento de Derecho Administrativo, Universidad de Granada. España
lmgarcialozano@ugr.es

RESUMEN

En el presente trabajo procedemos a estudiar las problemáticas suscitadas en las aguas subterráneas localizadas en zonas bajo los núcleos urbanos o en zonas limítrofes con ellos. De esta manera se examina los problemas de control de dichas masas, los problemas de contaminación y las medidas que se adoptan por la Ley, pero que se han revelado insuficientes.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas ha sido una materia sobre la cual, el legislador ha tenido serias dudas sobre su tratamiento desde la primera vez que las trató, pues se ha devaneado entre tratarlas como recursos subterráneos o como aguas procedentes de cursos fluviales o masas acuosas continentales. En consecuencia, su regulación se ha repartido durante largo tiempo entre las leyes de aguas y las leyes de minas.

De hecho, la primera de las regulaciones que se hizo de las aguas subterráneas se hizo a través de del Decreto Ley número 1009 de 1868, reguladora de la minería, donde se incluyeron las aguas que se encontraban en el subsuelo. A las mismas se les dio un tratamiento similar al de sustancias minerales subterráneas y, fue por ello por lo que se les incluyó en este texto normativo como un elemento más objeto de su regulación. Como decimos, esta norma previó una asimilación de las aguas a otros recursos subterráneos que las aguas tendrían un régimen similar al de los minerales subterráneos que se encontrasen en el curso de prospecciones o excavaciones. De esta manera el legislador procedía a desvincular el destino que tuviesen los minerales del que tuviese el terreno o suelo en el que se encontraban. Al extenderse esta regulación a las aguas que se encontrase en cavidades subterráneas y fuera de cursos fluviales, se procedía también a esta disociación entre propiedad del terreno y propiedad del recurso hídrico y, por tanto, la utilización y fin al que se dedicase este se separaba totalmente de la decisión de la propiedad en la que se encontrase. De hecho, la norma de 1868 procedió a atribuir la propiedad de las mismas a quien realizase el proceso de búsqueda y alumbramiento y, no al propietario del terreno[1]. Esto no era más que un reflejo de la limitación que sobre el derecho de propiedad se estaba procediendo a hacer durante el periodo liberal, para acabar así con el sentido absoluto del derecho patrimonial.

Esta primera iniciativa normativa de la década de los 60 del siglo XIX consiguió dar una respuesta más o menos contundente a la problemática de las aguas subterráneas. Sin embargo, no será la última iniciativa que se adoptase sobre este recurso. Ya con el cambio de siglo, se adoptará nueva normativa de corte reglamentaria que buscaba proteger la salubridad de las aguas continentales localizadas en

[1]Es un régimen similar al que se opera en la normativa española para otros objetos encontrados, como en el caso de los tesoros o restos arqueológicos que se consideraban parte del demanio público.

el subsuelo de cualquier tipo de filtraciones y muy especialmente, las que se encontraban en el ámbito urbano o de nuevos desarrollos. En este sentido, se aprobaron diversas iniciativas reguladoras como la Instrucción General de Sanidad de 12 de enero de 1904 o la Real Orden de 22 de abril de 1922 sobre la instalación de fosas sépticas, la Real Orden de 3 de enero de 1923 de instrucciones técnico-sanitarias para los pequeños municipios, o el Real Decreto de 9 de febrero de 1925 por el que se aprueba el Reglamento de Sanidad Municipal. Toda esta regulación que a la vuelta de 20 años se fue aprobando redundaba, en todo caso, en proteger las acumulaciones hídricas de cualquier tipo de vertido contaminante, tanto en ámbitos urbanos de pequeña población como de gran población.

Si bien, debe de destacarse que, junto al Decreto Ley de 1868, existió otra norma que afectó de manera incisiva la regulación sobre las aguas subterráneas. Nos referimos a la Ley de aguas de 1879, que estaría en vigor más de un siglo y, que sería derogada por la Ley de 1985, reguladora del mismo fluido. También se incorporaron algunos aspectos normativos sobre esta manera en el Código Civil de 1889 que modificó algunas aseveraciones de la Ley de Aguas previa[2], aunque su vigencia se ha visto matizada con la entrada en vigor del texto de 1985.

2. EL IMPACTO DE LA LEY 29/1985, DE AGUAS Y EL CAMBIO DE LA DISCIPLINA

La entrada en vigor de la nueva Ley de Aguas de 1985, por un lado, ponía fin a la vigencia de la centenaria Ley de 1879 y, por otro, introdujo innovaciones importantes en la regulación sobre el líquido recurso, que se plasmaron en diversas modificaciones y sobre todo, en la unificación bajo un mismo texto normativo del régimen de todos los recursos hídricos. De esta manera, se acababa con la dicotomía agua-recurso hídrico, agua-mineral subterráneo, optándose por la primera opción, a todas luces más acertada.

Precisamente por ello, se introdujo a través de esta vía la regulación sobre las aguas subterráneas como recursos hídricos y los acuíferos junto a la regulación de las aguas continentales superficiales, todo ello en el mismo texto normativo sin ningún tipo de criba o distinción, como se hizo en el siglo anterior. Además, a través del artículo 2 de la Ley decide dar por finalizado el tratamiento que tradicionalmente había dado al agua desde un enfoque privatista como bien sujeto a titularidad dominical en anos de privados, pasando a demanializar el agua subterránea como recurso básico para la vida, y que debe estar en manos del Estado que será quien lo tutele como un recurso más, de cara a asegurar el suministro hídrico a la totalidad de la población. Aun así, se contemplan diversas excepciones a casos muy determinados y, siempre de acuerdo a lo previsto en la propia norma legal. Del mismo modo, una de las consecuencias que tuvo la demanialización de las aguas subterráneas fue las mismas, de acuerdo a la ordenación que pretendía hacer el legislador de todas las aguas continentales iban a ser incluidas y estaban afectas a la planificación hidrológica tanto nacional como de cuenca[3]. Esta realidad nos hace ver cómo efectivamente, la traslación de la titularidad dominical de las aguas se hizo con un fin y, es poder incluir dichos recursos hídricos en la planificación, tutelar los mismos y, en las ocasiones que así lo decidan, poder explotar dichas aguas dependiendo de las necesidades momentáneas, dada la limitación de este recurso, a fin de asegurar el suministro de agua para los distintos usos que se prevén en la Ley, según la prelación en ella dispuesta[4]. De esta guisa, debe destacarse las cautelas que muestra el legislador en relación a los riesgos de contaminación de los acuíferos y aguas subterráneas, incluyendo, además, medidas cautelares para la defensa de las mismas, frente a posibles vertidos que se produjesen y que conllevasen un claro riesgo de

[2] A este respecto, hay que acudir al artículo 348 y ss. del Código Civil.
[3] Ello, habida cuenta la dicción de los artículos 15 y 38 y ss. de la Ley de 1985.
[4] De este modo, y de cara a la explotación de las bolsas de agua, el propio legislador introdujo una novedad y fue la posibilidad de instituir comunidades de usuarios de recursos hídricos en torno a un acuífero o a una bolsa de agua subterránea, hecho que se consagra en el art. 29 y, se disciplina en los arts. 73 y ss. Sobre las Comunidades de Usuarios vid.: García Vizcaíno, M. J. (2008).

contaminación (art. 92 y ss. de la Ley; Sanz Rubiales, 2002). Es algo que desde principios de siglo y, con el crecimiento demográfico en las zonas urbanas, ha obsesionado al legislador.

Precisamente, debemos de señalar que uno de los grandes problemas que presentan las aguas subterráneas de cara a la planificación es cuantificar la cantidad de hectómetros que hay en los acuíferos (López Geta, 2006). Esto supone un importante inconveniente, pues con las prospecciones que se hacen puede atisbarse y hasta acercarse a la cantidad de agua embolsada en el subsuelo, pero es difícil de saber con certeza el aporte que supone cada acuífero o bolsa de aguar subterránea a los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica y, por tanto, poder concretar la planificación hidrológica y las reservas que en dicha cuenca. Tanto es así, que en pocos organismos de cuenca se atreven a dar datos exactos sobre la cantidad reservada en los acuíferos, a diferencia de otro tipo de acumulaciones como los embalses o pantanos y, hasta en los propios cauces fluviales. Esto hace que los datos publicados sean tan sólo aproximados al realizarse con base en parámetros y variables no siempre exactos.

Pero no es el único problema ante el que se encuentran las Administraciones hídricas, pues el segundo y más extendido es la incapacidad de controlar la contaminación en dichos embalsamientos derivada de filtraciones provenientes de la superficie. La imposibilidad de saber hasta dónde se extienden los acuíferos de manera fehaciente si no se realiza un control casi diario, impide poder evitar la contaminación de dichas bolsas de agua, que a veces puede ser parcial o total e incluso dejar inservible el acuífero durante un largo periodo de tiempo hasta su saneamiento y limpieza.

El tercero de los problemas ante el que nos encontramos es el surgimiento indiscriminado de la realización de pozos en busca de agua y, su utilización sin ningún tipo de control por parte del organismo de cuenca. Por tanto, si ya difícil es cuantificar la cantidad de agua embalsada, una vez incluida una previsión del agua disponible para el año hídrico, más difícil resulta controlar la explotación indiscriminada de dichos recursos subterráneos.

- En consecuencia, a la difícil cuantificación de los haberes se une el vaciamiento sin control por parte de privados -que en algunos casos se realiza de manera intensa- así como la contaminación, hace que esas previsiones al final se revelan erróneas e insuficientes para atender las necesidades que pudieran aparecer. En este sentido, la búsqueda de recursos y, su posterior utilización incluso en régimen de sobreexplotación (Pulido Bosch, 2000), deriva en varias situaciones, como son:
- La falta de solicitud de autorización para realizar las prospecciones con las que encontrar agua en una zona del país donde hay espacios en los que escasea de manera recurrente, ha derivado en la aparición de un abundante número de pozos ilegales con la inseguridad que esto ha provocado de cara a la planificación hidrológica.
- La inexistencia de solicitud de autorizaciones y de su correspondiente concesión para el uso de las aguas, lo que deriva en una explotación de los recursos hídricos de manera ilegal y por medio de actuaciones que derivan en un progresivo vaciamiento de los embalsamientos de recursos sin control administrativo alguno y, por tanto, sin quedar constancia de ello, por lo que el organismo de cuenca, de cara a poder administrar correctamente los embalsamientos de agua existentes en el territorio de la demarcación, puede tener unas previsiones que no sean reales dadas las actuaciones ilegales antes referidas.
- El desconocimiento por parte de los poderes públicos de la cantidad de pozos realizados y horadados en nuestro territorio nacional y, la dificultad de evitar las sacas y levas de agua. Ello favorece la existencia de una compraventa ilegal de agua y, la existencia de un mercado (Alcaín Martínez, 2005) negro de este recurso, que difícilmente se ataja por parte de los organismos de cuenca.

La publificación de la titularidad del agua subterránea ha posibilitado la inclusión de una cantidad importante de recursos a la previsión con la que antes no se contaba y, que, además, estaban en manos privadas como un elemento de propiedad más. Este cambio de titularidad dominical fue precisamente fomentado de acuerdo con la unidad de ciclo hidrológico y la necesaria regulación del uso del recurso ante la dificultad de cuantificar la cantidad de recurso disponible y, la difícil captación del mismo dadas las circunstancias de su localización.

Pero quizás el gran problema al que nos enfrentamos en nuestros días es precisamente la contaminación de dichas aguas que antes ya se mencionó, con lo que, pese a la inclusión de las mismas entre las reservas de la planificación, el resultado conllevaría la imposibilidad de su aprovechamiento si se diese algún proceso contaminador.

3. LA CONTAMINACIÓN URBANA DE LOS ACUÍFEROS

La conservación de la calidad de las aguas y posibilitar su posterior uso y aprovechamiento, es también uno de los fines que se marcan los organismos de cuenca en su actuación. En este sentido, este control cualitativo requiere implantar una plantilla especializada dentro del personal de cada Administración que vigile las aguas territoriales y, de otro lado, los vertidos indiscriminados que se realice a los cauces y, que puedan afectar los acuíferos a través de filtraciones. En esta línea se pronunció en su momento el legislador de 1985, incluyéndolo como una de sus preocupaciones. Precisamente, al demanializar la propiedad sobre el agua, en cierto modo, buscaba promover la concienciación entre la ciudadanía del respeto a lo público y, la necesidad de cuidar bienes como el agua, que tan necesaria es para todos los procesos vitales y de producción. Así mismo, con la demanialización se resolvía otro problema, cuál era la imposibilidad de control de un bien en manos privadas y, que además pudiera encontrarse en terreno de titularidad, a su vez, privada. Al pasar el recurso hídrico a ser propiedad pública se posibilitaba a la Administración tener un acceso más fácil y directo para controlar la calidad de las aguas y, de esta manera, promover las medidas adecuadas a fin de evitar la contaminación o tendentes a paralizar ésta si se estuviese produciendo. A su vez, al tener un acceso mucho más fácil a las bolsas de agua, se permite conocer la cantidad de recurso disponible en dichos acuíferos, con lo que se podría hacer una previsión de los recursos que estarían disponibles durante el año hídrico mucho más ajustada.

Un sistema que mantuviese la propiedad del agua en manos privadas supondría obstaculizar, e incluso impedir, desarrollar estos controles que le permitiesen conocer de manera más o menos certera, no sólo la cuantía de recursos, sino la calidad -y, por tanto, el posible aprovechamiento y uso- de las aguas. Tal es el interés que mostró el legislador por proteger las aguas subterráneas que llegó a prohibir que aquellos propietarios de los terrenos o fundos por los que circulasen realizaran cualquier tipo de obra, de remoción o de actuación que pueda perjudicar la calidad de las aguas. De tal manera se expresa el artículo 12 del TRLA confirmando esta dicción, así como otras prohibiciones a los titulares dominicales de los terrenos[5]. De esta guisa, permite una organización del suministro mejor y asegurar la prestación de este, para boca a las poblaciones y núcleos urbanos que lo precisen. Así mismo, sólo con esta medida se podría llevar a cabo de manera plena la ejecución e implantación del principio de unidad de ciclo hídrico, pues de lo contrario tendríamos, de un lado, una serie de recurso hídricos en manos públicas afectos a prestar un servicio público y, de otro, cantidades de agua en manos privadas que derivarían en un mercado especulativo (Arrojo Agudo y Azqueta Oyarzun, 2000).

La protección de las aguas subterráneas es una cuestión compleja, tanto en cuanto, se requiere la implantación de políticas públicas tendentes a la conservación del recurso para posibilitar su correcto

[5] La prohibición también está dirigida a evitar cualquier tipo de obra que tenga como fin la utilización, extracción o paralización y estancamiento de las aguas, con lo que se menoscabe la cuantía de la reserva o se favorezca su deterioro.

embalsamiento de cara a su posterior uso, así como su extracción y recuperación del mismo, e incluso, su mejora para que su aprovechamiento se realice en las mejores circunstancias posibles sin infringir ningún tipo de perjuicio en el recurso (Ortega Álvarez, 1994). Pero a ello hay que añadir que, durante el primer momento temporal, esto es, durante la conservación, se impone la realización de tareas periódicas de evaluación y control del estado en el que se encuentra el agua con el fin de conocerlo de manera fehaciente, así como, atender a la posibilidad de adoptar medidas que contengan la degradación del acuífero e incluso la mejora del recurso al objeto de un posterior aprovechamiento. Sólo con estos análisis periódicos será posible atajar cualquier atisbo de contaminación que aparezca o que surja y, del mismo modo, se conseguirá desarrollar a tiempo procesos dirigidos a contrarrestar los efectos de la contaminación que impedirían y, de otro lado, iniciar procesos de restauración medioambiental cuando estos sean viables económica pero también técnicamente.

Las aguas subterráneas se han convertido en un recurso importante para la planificación hídrica, habida cuenta la facilidad de obtención y extracción y, el bajo coste que supone para las arcas públicas su explotación. Pero, de la misma manera, estamos ante un recurso limitado en su cantidad y, aunque suele ser un agua de calidad, se corre el riesgo de una fácil contaminación sin que nadie pueda evitarlo, o que no se llegue a tiempo para paralizar el flujo contaminante y, en consecuencia, no pueda utilizarse el recuso en casos de que fuese necesario.

3.1. La contaminación de las aguas subterráneas en el ámbito urbano

Nuestro texto constitucional ha previsto la adopción y aplicación de políticas públicas destinadas a la protección del Medio Ambiente y, de manera indirecta, de las aguas como elemento del entorno, a tenor de los previsto en el art. 45.2 CE. Precisamente, el Constituyente y, posteriormente, el legislador con bastante habitualidad, dejan claro la necesidad de compatibilizar el desarrollo urbanístico y el progreso de los núcleos poblacionales, con la conservación y promoción del Medio Ambiente. En tal sentido, también se pronunció la UE en su Derecho originario, al consignar en el art. 191.1 TFUE la necesidad de promover desde los poderes públicos, medidas protectoras y conservacionistas de la calidad del Medio Ambiente, así como el uso de los recursos naturales y su gestión de modo sostenible, buscando en este sentido, la compatibilización de la misma con el progreso urbano. Este objetivo fue asumido por el legislador europeo en el ámbito de las aguas subterráneas de manera concienzuda, encomendando a los Estados miembros de la Unión Europea la necesidad de adoptar medidas tendentes a evitar la filtración de contaminantes en esta tipología de aguas, a fin de evitar su deterioro y para interrumpir todo tipo de aumento de la concentración de contaminantes derivados de la actuación humana (Caro-Patón Carmona, 2017). Así pues, se dispone que deberán de proveerse medidas para la protección, regeneración o mejora de cualquier tipo de acuífero, de un lado y, de otro, promover un equilibrio entre la alimentación de una masa hídrica y la extracción con el objeto de asegurar el adecuado estado de la misma[6] (art. 4.1.b de la Directiva de Medio Ambiente del año 2000). De todos modos, cuando a una determinada reserva de recursos pudiera serle aplicable uno o varios objetivos de calidad ambiental de acuerdo con las exigencias de la normativa europea, se le aplicará el que sea de nivel más alto o exigente tal y como recoge el art. 4 apartado 2 de la Directiva.

Siguiendo el mandato del legislador europeo, se traspuso la Directiva en la legislación española a través de la reforma de la Ley de aguas en la que se recogieron los nuevos principios protectores que fomentaban el auge en la calidad de las aguas -l que ha sido una asignatura pendiente en nuestras aguas continentales durante largo tiempo-, la eliminación o minimización de procesos contaminantes sobre todo de procedencia urbana y, el aprovechamiento sostenible del recurso a fin de mantener las reservas hídricas y evitando la sobreexplotación. El Texto Refundido de la Ley de Aguas pasó a establecer que para conseguir una protección de las aguas subterráneas que permita un posterior aprovechamiento de manera correcta deberá de cumplirse con el contenido de la Directiva europea.

[6] Se dispuso como límite temporal en 2015.

Así pues, de acuerdo con las exigencias europeas, el estado de las aguas subterráneas es el que alcanza una masa de recurso hídrico cuando el nivel o cuantía de recursos hídricos embalsados como el estado químico son correctos de acuerdo con los parámetros científicos, hoy fijados en la normativa europea.

De cara al estado cuantitativo debemos decir que será bueno siempre que exista un equilibrio entre las extracciones directas e indirectas sostenido que permita el mantenimiento el embalsamiento a través de nuevas filtraciones de agua desde el exterior. Por tanto, será adecuado cuando el nivel medio de extracción en el año hidrológico observado a largo plazo no supere en ningún caso el nivel de agua disponible y, el nivel piezométrico no se vea afectado por modificaciones derivadas de actuaciones del hombre que puedan conducir a que los parámetros de calidad ambiental especificados para las aguas superficiales vinculadas no se vean cumplidos.

Por cuanto se refiere al aspecto químico, debemos decir que asistiríamos claramente a una pérdida de calidad de las aguas embalsadas cuando se produjese una pérdida de la calidad en las aguas superficiales o cualquier empeoramiento relevante de los ecosistemas terrestres vinculados que dependen directamente a los embalsamientos de agua subterránea (art. 2 apartado 28 de la Directiva) y que repercutirán negativamente en dichos embalsamientos. También hay que tener en cuenta el estado químico de los acuíferos que se considerarán buenos cuando ante la presencia de contaminantes, no presenten efectos de salinidad u otras intrusiones, y no se superen los niveles dispuestos en las normas de calidad europeas. No lo serán cuando se den estas circunstancias que cristalicen en la imposibilidad de alcanzar los objetivos ambientales especificados para las aguas superficiales asociadas, ni originen disminuciones significativas de la calidad ecológica o química de estos embalsamientos hídricos, o no se produzcan daños reseñables en los entornos terrestres vinculados a dichas masas de agua subterránea, tal y como se recoge en el art. 2 apartado 25 de la Directiva europea.

Las razones que pueden derivar a una perturbación en la calidad de las aguas embalsadas son muy diversas. No podemos descender a los factores naturales dado la limitación de este trabajo, pero sí pasaremos a hablar de la contaminación de procedencia urbana que sí centra nuestro objeto.

3.2. Los factores contaminantes procedente de los núcleos poblacionales

La actividad humana y la falta de concienciación se ha revelado, con bastante frecuencia, como un fenómeno contaminador y, agresivo contra el Medio Ambiente. La actividad humana y la emisión de vertidos o la producción de desperdicios deriva en filtraciones a numerosos acuíferos que transitan debajo o cerca de establecimientos urbanos, con lo que se contamina la totalidad de la masa hídrica, con el consecuente perjuicio de cara a un futuro aprovechamiento y uso del embalsamiento.

Entre los primeros factores de contaminación se encuentran, obviamente, las actividades domésticas que la población realiza en su día a día. El nivel de consumo de productos de "usar y tirar" derivan en la producción de una gran cantidad de residuos, entre los que se encuentran residuos contaminantes en estado líquido. El uso indiscriminado de sustancias contaminantes, unido a la falta de tratamiento o incorrecto tratamiento de las aguas residuales, y a su vez por la existencia de liberación de los residuos por lixiviación, pozos negros o fosas sépticas, y filtraciones desde la red de alcantarillado, sin ningún tipo de control. Esto es algo frente a lo cual ya se intentó poner medidas a principios del siglo XX, aunque con un éxito desigual.

La segunda variable o factor contaminante la encontraríamos en las actividades industriales producidas en los núcleos urbanos y, de manera más concentrada en los polígonos industriales. Esta contaminación se produce en todos los ámbitos sectoriales de la actividad económica, en mayor o menor medida. De este modo, un especial detenimiento debemos hacer en torno a las industrias

químicas y petroquímicas que por cualquier tipo de disfunción[7] deriven en una contaminación orgánica pero también inorgánica. En el ámbito de la industria metalúrgica se produce una contaminación insalubre y nociva por metales pesados y, en el caso de la industria alimentaria se produce una contaminación orgánica. Podríamos enumerar otras, como la producción de artículos de marroquinería o curtidos que precisa de altas cantidades de agua con las que tratar las pieles y el previo tintado.

Otro de los sectores más contaminantes es precisamente la actividad ganadera debido a la concentración de explotaciones ganaderas. La tipología de los contaminantes producidos es similar a la doméstica, pero más concentrada e intensa, esto es orgánica, descendiendo los niveles de los productos químicos y, ascendiendo los niveles de contaminación orgánica.

Vinculada a la anterior, encontramos otra variable contaminante, aunque menos urbana, es la procedente de las explotaciones agrícolas. En dichas actividades, se utilizan abonos que producen filtrados en la tierra y que pueden perjudicar las masas de agua subterránea. Del mismo modo, la utilización de productos químicos y pesticidas que seguir el mismo ciclo que el caso de los anteriores. Este problema de contaminación por nitratos se localiza de manera importante en la zona del litoral mediterráneo, en la zona del Júcar, en las zonas interiores de la Submeseta Manchega o en las depresiones del Ebro y del Guadalquivir. La contaminación derivada de la agricultura por el uso de este tipo de productos fitosanitarios favorece un alto nivel de contaminación a razón de compuestos orgánicos, pero también químicos cuya masiva utilización puede perjudicar las masas hídricas que se localizasen subterráneamente.

Así mismo, hay que traer a colación la actividad minera, como industria altamente contaminante, ya que se utiliza agua para las evacuaciones de la mina y para los lavados de minerales y de escombreras. La falta de permeabilización de los embalsamientos y las filtraciones producen una gran contaminación derivado de la extracción de dichos minerales y que es difícil de revertir, como se ha revelado en diversas oportunidades.

A todos estos factores, podemos añadir la contaminación de acuíferos a causa de la realización de pozos que horadados y, posteriormente entubados. Las entubaciones en sí mismas, cuando no fuesen correctamente conservadas, estuviesen en mal estado, o se encontrasen oxidadas, corroídas o rotas pueden derivar en un claro perjuicio de la masa hídrica, impidiendo de esta manera un futuro aprovechamiento de la misma. Esto mismo sucede cuando nos encontramos ante pozos con una construcción deficiente o con un proyecto incorrecto, o incluso del que se hace un mal uso que provocan la comunicación de varios acuíferos, o de estos con las aguas superficiales, o la transmisión de recursos desde un embalsamiento a otro, si la procedente de uno de ellos tuviese algún tipo de contaminante que impidiese la correcta conservación e incluso un posterior uso.

Se puede, además, incluir que la presencia de contaminantes en las aguas subterráneas puede tener como razón la deficiente calidad del fluido hídrico de renuevo a nivel de superficie y la salinización derivada de un uso incorrecto de los pozos costeros, o aquellos en los cuales hay un manto de fluido con alta conductividad. Esta problemática podemos observarla sobre todo en la zona del Mediterráneo. Aunque no sólo esto ocurre por estas razones, sino también y, como no podía ser de otra manera, por causas geológicas y, es que, si el terreno por el que se filtra tuviese una alta conductividad, esta traspasaría al agua, lo que malograría la misma y cualquier tipo de acumulación donde se embalsase posteriormente.

[7] Disfunciones motivadas por fugas, depósitos, enterramientos o liberaciones residuales que perjudiquen cualquier tipo de acuífero subterráneo que se hallase en las inmediaciones de la localización de la sede industrial.

Habida cuenta todo esto, a la hora de llevarse a cabo la planificación tanto del territorio como urbana (Fernández Sánchez, 2001), debe tener en cuenta la localización de los acuíferos, así como de las conducciones subterráneas hacia ellos, para ordenar los tipos de suelo, algo que con bastante frecuencia no se tiene en cuenta al atenderse sólo a las conducciones fluviales externas, pero no a las internas.

4. FORMAS DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El legislador tanto europeo como nacional, acogiendo las indicaciones técnicas y de la doctrina académica, ha disciplinado diversas técnicas de protección de las aguas subterráneas que tienen diversas funciones. Entre ellas, se destaca la finalidad preventiva o, la represiva y reparadora.

Con respecto a las formas de protección de las aguas fluviales y subterráneas, encontramos diversos métodos que pueden ser preventivos, activos o represivos. En el primero de los casos incluimos las intervenciones que las Administraciones obran antes de que se produzca la utilización de las aguas públicas. Su fin es el de evitar cualquier tipo de daño que pueda producirse al demanio hídrico. Por cuanto respecto a los métodos activos, estos se llevan a cabo en el ámbito de la actividad común de las Administraciones, que incorporan competencias en el ámbito de la tutela del Medio Ambiente. Finalmente, los represivos son aquellos tendentes a reprender y reprimir la utilización abusiva del agua que ha degradado o amenaza con degradar su calidad.

Si bien, ante todo se parte de la general prohibición recogida en la legislación patria por la que la realización de cualquier actividad puede derivar en la degradación de cualquier fluido hídrico. En concreto, se censura la acumulación de cualquier tipo de residuo en zonas del entorno hidráulico protegido por el plan hidrológico y, que estos puedan suponer un peligro de contaminación de las aguas o de degradación de su entorno, de conformidad a los dispuesto en el artículo 97 de la Ley de Aguas.

Así las cosas, el grado de protección máximo sólo se obtendría mediante la prohibición absoluta y generalizada de llevar a cabo cualquier tipo de acto que pueda contaminar el demanio público, como hace en el artículo 12 de la Ley de Aguas. Sin bien, esto resulta difícil de asegurar en el día a día ya que supondría el colapso de la Economía y, la tutela del Medio Ambiente debe de conjugarse junto a otros principios recogidos en la Constitución y, que posibilite y permita el desarrollo económico.

Dentro de esta actividad preventiva también debería de incluirse la planificación hidrológica y las autorizaciones puntuales de vertidos, como complemento a esa prohibición generalizada.

Sin embargo, en ningún caso vincula la planificación territorial o urbana a la existencia de un acuífero, como ya hemos dicho anteriormente. Si se obrase una planificación mucho más eficiente en este sentido, se evitarían perjuicios económicos a los privados que basasen sus expectativas económicas en una planificación urbana incorrecta, pero que el legislador después permite denegar o paralizar actividades económicas que se han desarrollado de acuerdo a las previsiones de un PGOU.

El segundo bloque de medidas se identifica con la potestad sancionadora de la Administración y, por tanto, la existencia de un régimen de infracciones y sanciones administrativos y, la obligación de reparar el daño causado. Sería aquí donde entraría la planificación urbana y la correcta localización de los acuíferos, hecho, que, si bien sí se desarrolla en el ámbito de las Administraciones de Cuenca, no tanto en las locales a la hora de realizar sus Planes de Ordenación Urbana ni de ejecutarlos.

CONCLUSIONES

Habida cuenta todo lo que hemos ido analizando a lo largo de este estudio, podemos concluir lo siguiente:

Primero.- Nuestro legislador ha previsto un régimen de protección de las aguas pero lamentablemente se ha revelado insuficiente para proteger las reservas de aguas subterráneas.
Segundo.- La falta de concienciación de la ciudadanía ha creado focos altamente contaminantes derivados de la vida diaria y de las actividades económicas e industrias productoras. A ello se añade la falta de planificación territorial por parte de las administraciones competentes que no tienen cuenta la existencia de los acuíferos a la hora de elaborarla y que perjudica su permanencia y explotación.
Tercero.- Se debe de proceder a introducir una reforma legislativa que adopte medidas proteccionistas y de concienciación que permitan una mejora en la protección y control de las masas hídricas subterráneas y, a su vez, conlleve una mejora en el control de las mismas a fin de evitar extracciones indiscriminadas.

REFERENCIAS

- Alcaín Martínez, E. (2005). Aspectos jurídicos-privados del mercado de aguas: especial referencia a las aguas subterráneas. Melgarejo Moreno, J., Molina Giménez, A. Los mercados del agua: Análisis jurídicos y económicos de los contratos de cesión y bancos de agua, 255-284.
- Arrojo Agudo, P., Azqueta Oyarzun, D. (2000). Valoración de las aguas subterráneas en el marco económico general de la gestión de aguas en España.
- Caro-Patón Carmona, I. (2017). Aguas subterráneas, biodiversidad y Derecho comunitario. José Carlos Laguna de Paz, J. C., Sanz Rubiales, I., de los Mozos Touya, I. (2017) Derecho administrativo e integración europea: estudios en homenaje al profesor José Luis Martínez López-Muñiz, V. 2, T. 2, 1277-1304.
- Fernández Sánchez, J. A. (2001). Protección de las aguas subterráneas en el desarrollo del territorio. Sánchez Vila, X., Iribar Sorazu, V., Grima Olmedo, J. Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional, 99-106.
- García Vizcaíno, M. J. (2008). Comunidades de usuarios de aguas subterráneas. Embid Irujo, A. Ciudadanos y usuarios en la gestión del agua, 397-412.
- López Geta, J. A. (2006). ¿Cuánta agua hay? Las aguas subterráneas: Disponibilidad. De la Orden Gómez, J. A., Pérez Zabaleta, A., López Geta, J. A., El análisis económico en la Directiva Marco del Agua: Incidencias e implicaciones para España, 145-160.
- Ortega Álvarez, L. I. (1994). La protección de las aguas subterráneas. Embid Irujo, A. La calidad de las aguas, 47-72.
- Pulido Bosch, A. (2000). La explotación de las aguas subterráneas y su implicación en la desertización. Boletín geológico y minero, 111, 5, 3-18.
- Sanz Rubiales, I. (2002). La contaminación de las aguas subterráneas en España: diagnóstico y propuesta de actuaciones. Régimen jurídico de las aguas subterráneas, 99-122.

BLOQUE II
Medidas de mitigación e infraestructuras.



Excmo. Ayuntamiento de Orihuela

DIPUTACIÓN DE ALICANTE CICLO HÍDRICO

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

IUACA
INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

ORDENACIÓN DEL TERRITORIO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES: PROPUESTAS.

Jorge Olcina Cantos
Instituto Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante
jorge.olcina@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-4846-8126

RESUMEN

La ordenación del territorio ha pasado a ser, en los últimos años, un proceso técnico-administrativo eficaz para la reducción del riesgo natural en muchos países. Apoyada en el empleo de mapas de riesgo permite evitar la ocupación de áreas de peligrosidad frente a peligros naturales de desarrollo frecuente. Recientemente, cuenta con una herramienta de planificación y gestión eficaz y adaptada a los criterios de sostenibilidad: es la infraestructura verde, concepto sin una definición universalmente aceptada, pero que se ha ido incorporando en normas y planes territoriales como técnica de reducción del riesgo natural y de los efectos del cambio climático. El trabajo realiza un repaso por las cuestiones conceptuales y de método de la ordenación territorial y la infraestructura verde como herramientas para la reducción del riesgo natural. Se presentan algunos ejemplos como modelos de buenas prácticas para la gestión territorial sostenible.

1. ORDENACIÓN DEL TERRITORIO, HERRAMIENTA PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO NATURAL

La ordenación del territorio es la "expresión espacial de las políticas económicas, sociales, culturales y ecológicas de la sociedad. Es a la vez una disciplina científica, una técnica administrativa y una política concebida como un enfoque multidisciplinario y global, cuyo objetivo es un desarrollo equilibrado de las regiones y la organización física del espacio según un concepto rector" (Carta Europea de Ordenación del Territorio, 1983). De manera que todo proceso de ordenación del territorio integra una acción administrativa (generalmente pública) que se rige por una normativa legal específica y una reflexión científico-técnica donde se abordan las propuestas para mejorar el estado del territorio. La ordenación del territorio es una acción orientada para la práctica que comprende un proceso de elección entre diversas alternativas, de manera que es necesaria la existencia de un plan de usos alternativos, justificado a partir de unos criterios (ambientales, socio-económicos), que determinan el nuevo modelo territorial a desarrollar. La puesta en marcha de este nuevo programa de actuación requiere una voluntad política decidida; de ahí que, en gran medida, la ordenación del territorio sea la expresión de una ideología sobre el territorio.

La ordenación del territorio parte del principio de que todo espacio geográfico sobre la superficie terrestre está organizado. Los grupos sociales que se han establecido en él lo han dotado de un sistema de relaciones en el que se fundamenta el propio desarrollo de esa sociedad. Puede –suele- ocurrir que dicha organización requiera modificación en alguno de sus elementos (naturales, sociales, económicos, infraestructurales, etc.) porque requieran adaptación a una nueva realidad. En este momento se pone en marcha un proceso de ordenación del territorio que culmina en la elaboración de un plan (planificación) donde se describe el nuevo modelo territorial.

Los procesos de ordenación del territorio implican tres fases. Una primera, de carácter jurídico que

supone la redacción de un texto legal donde se definen los principios, objetivos e instrumentos de la ordenación territorial; a continuación, se lleva a cabo la fase de planificación en sentido estricto que incluye la redacción de un programa o plan territorial con el nuevo modelo a aplicar. Por último, se lleva a cabo dicho plan que culmina, al menos en el plano teórico, con la transformación de la realidad territorial de acuerdo con lo establecido en la fase anterior.

Un aspecto esencial de la ordenación del territorio es su condición de proceso escalar, de manera que las escalas de trabajo inferiores (local) deben incorporar las determinaciones de planificación territorial que se contengan en leyes y planes de escala superior (estatal, supra-estatal). Y ello teniendo en cuenta la organización político-administrativa de los estados, puesto que algunos conceden el protagonismo a la escala estatal y otros a las escalas regionales. Generalmente, la escala local tiene reconocidas las competencias de planificación urbana y la elaboración de planes para desarrollar este fin.

La ordenación del territorio tiene como fines principales en toda sociedad democrática: a) garantizar la participación de la población afectada; b) coordinar las distintas políticas sectoriales; c) respetar los valores, culturas e intereses de las diversas regiones o comarcas y; d) considerar la situación actual, la tendencia y la evolución a largo plazo de las políticas sobre el territorio. Y en la actualidad la ordenación del territorio tiene unos retos en el marco de la sostenibilidad, como principio rector de las actuaciones planificadas: 1) debe considerar los recursos y los riesgos del medio físico; 2) debe incorporar las normativas ambientales emanadas por las administraciones competentes: 3) debe cumplir la jerarquía de las escalas de trabajo que son fundamentales en la práctica jurídica; y 4) debe incorporar una fase de diagnóstico continuado a partir del diseño de indicadores de seguimiento para la evaluación continua de los planes. Y todo ello bajo el principio de la transparencia y la información en abierto a la sociedad por parte de las administraciones competentes.

Si se tiene en cuenta la necesidad de ir adaptando la ordenación territorial a la dinámica socio-económica y ambiental de los territorios, hay un proceso actual que va a determinar la planificación territorial en los próximos años: el cambio climático. El calentamiento térmico y los efectos previstos en las temperaturas y precipitaciones en las diferentes regiones del mundo va a condicionar la planificación del territorio que debe convertirse en una herramienta eficaz de adaptación al cambio climático. La pérdida de confort térmico que se prevé en las próximas décadas puede encontrar en el diseño de edificios (arquitectura bioclimática) o de zonas verdes en las ciudades un elemento de reducción de su impacto. Por su parte, el aumento en las lluvias intensas y los procesos de inundación que se manifiesta ya en varias regiones del mundo debe mitigar sus efectos con propuestas de ordenación del territorio basadas en el uso de cartografías de riesgo y delimintación precisa de áreas donde no plantear usos intensivos del suelo por su elevada peligrosidad. Sin olvidar los efectos que el calentamiento climático está teniendo en zonas costeras por la subida del nivel del agua del mar y que va a condicionar actuaciones territoriales en las áreas litorales durante las próximas décadas.

La ordenación del territorio ha ido mejorando sus procedimientos y métodos de trabajo en las últimas décadas, en relación con la aparición de normas que han mejorado la consideración de los elementos naturales y culturales del medio como piezas importantes a considerar en la planificación de nuevos usos. En muchos países del mundo occidental se ha pasado de concepciones básicamente económicas de la planificación territorial, que consideran el suelo como un espacio de posibilidades, de asignación directa de nuevos usos, a posiciones que valoran los recursos naturales y el patrimonio histórico-artístico como piezas principales de los territorios, a partir de delimitación y protección, se pueden diseñar nuevos usos que sean compatibles con aquellos.

Dos nuevos elementos se han incorporado a la planificación territorial de los países europeos en las últimas décadas. Por un lado, el paisaje, que se ha ido convirtiendo en un instrumento operativo a la

hora de establecer nuevos usos en el territorio. Los principios contenidos en el Convenio Europeo del Paisaje de 2000 han sido integrados en las normativas urbanísticas y del territorio de los países y regiones de la Unión Europea. Las "unidades paisajísticas" han pasado a ser un objeto de trabajo principal en los estudios de sostenibilidad ambiental. Por otro lado, la infraestructura verde territorial, como instrumento básico e inicial de todo proceso de planificación. Se trata de un concepto que surge en la arquitectura del paisaje norteamericana de las primeras décadas del siglo XX (Law Olmstead), que recogerá ideas ambientalistas de los siglos XVIII y XIX (Mell, 2008), y que se ha ido incorporando en las últimas tres décadas a la planificación territorial de escala diversa, regional y local, principalmente (Breuste, J. et al. eds, 2015). Como conexión conceptual y aplicada entre ambos elementos, la infraestructura verde se define como una red interconectada constituida por paisajes de gran valor ambiental, cultural y visual.

Por tanto, la infraestructura verde integra, como objeto de planificación, al conjunto de paisajes definidos en un territorio, pero además diseña la conexión entre ellos basándose en conectores naturales o artificiales ya existentes o propuestos (Fig. 1).

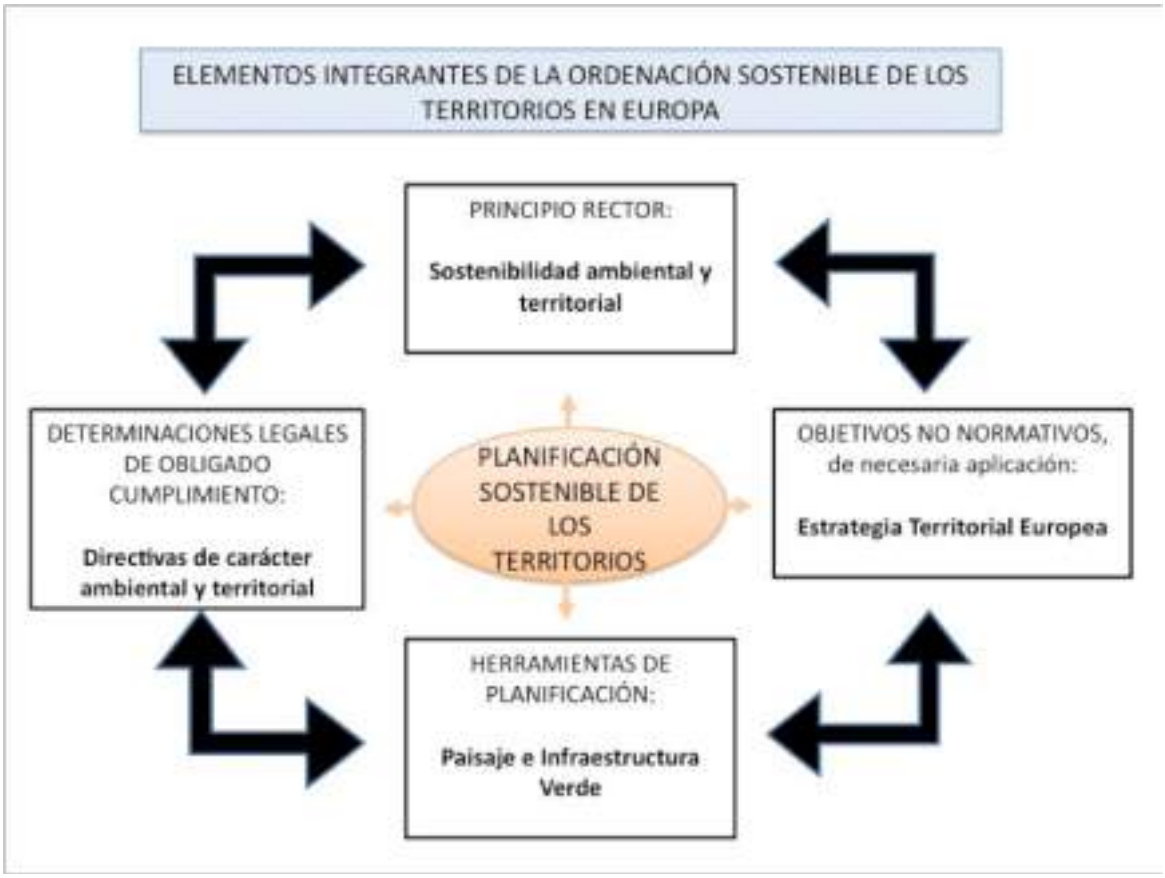


Figura 1. Elementos integrantes de la ordenación sostenible del territorio en Europa.
Fuente: elaboración propia.

La confianza depositada en unas supuestas capacidades de resistencia y control de la naturaleza por medio de actuaciones estructurales (presas, canalizaciones, etc.), motivó, de un lado, la promoción de la agricultura de regadío en territorios climáticamente poco aptos y de otro, la integración forzada de los tramos finales de cursos fluviales y la usurpación de sus lechos de inundación en áreas urbanas, con los problemas posteriores añadidos que eso implicó (Pérez et al., 2016). Esto ha sido especialmente intenso y acusado en los espacios litorales de gran parte del mundo que concentran gran parte de la actividad económica y de los principales asentamientos urbanos de nuestro planeta.
Las acciones de reducción del riesgo de inundación en todo el mundo durante los últimos años reflejan

los cambios que se han producido en política hidráulica en el sentido de que, con diferentes ritmos e intensidades, ha ido evolucionando de acciones únicas, como los enfoques de ingeniería (obra civil) para controlar crecidas fluviales, a una aceptación más completa del enfoque de "rango de elección". desarrollado por Gilbert White hace más de 70 años. Es decir, el control de inundaciones funciona, pero también otras acciones como el desarrollo de sistemas de alerta y planificación de emergencias; la adaptación del entorno construido a los niveles de inundación, el desarrollo de un sistema de seguros contra inundaciones. La Directiva Europea de Inundaciones de 2007, en particular, ha fijado la necesidad de un enfoque no estructural para la reducción del riesgo de inundaciones y algunos países van más allá y hablan de la necesidad de definir y garantiza el denominado "espacio para los ríos". Paralelamente, un número creciente de voces del campo ambiental comienza a enfatizar la importancia crítica de las inundaciones para ciertos procesos socioecológicos y, algunos autores, hablan de la necesidad de incorporar las inundaciones al conjunto de servicios naturales necesarios en una sociedad.

Si bien estos nuevos enfoques se hacen eco del giro ocurrido en los últimos años en la gestión del riesgo de inundaciones y, en general, las políticas del agua hacia visiones más integradas que están ganando impulso en muchas regiones del mundo, la exposición al peligro de inundaciones continúa aumentando. El ritmo de la urbanización, en particular, está favoreciendo la ocupación de áreas de riesgo. El resultado es que una cantidad cada vez mayor valor material (viviendas, enseres, equipamientos) se acumula en áreas con riesgo de inundación hasta el punto de que las pérdidas absolutas se disparan incluso con episodios de crecida modestos. Por lo tanto, la exposición creciente se traduce en pérdidas absolutas crecientes, aunque no necesariamente en una vulnerabilidad creciente debido al efecto del aumento paralelo en la capacidad de adaptación (White, Kates y Burton, 2001). En otras palabras, las áreas expuestas a inundaciones y otros peligros naturales en el mundo desarrollado han podido absorber en su mayor parte los impactos causados por los peligros naturales sin grandes perturbaciones económicas, sociales y ambientales. Incluso las pérdidas, cuando se normalizan en términos económicos, no parecen mostrar siempre la tendencia creciente asumida en muchos análisis, particularmente aquellos que incorporan a la ecuación los efectos del cambio climático (Barredo, 2009). Por lo tanto, es posible hablar de una creciente resistencia social ante un peligro natural que surge principalmente del desarrollo de capacidades de adaptación que tienen en cuenta todas las etapas del proceso de ocurrencia de desastres.

2. LUCES Y SOMBRAS DE LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO NATURAL EN ESPAÑA

Desde 1998 la legislación urbanística española incluyó preceptos para incorporar análisis de riesgos naturales en los procesos de planificación del suelo. Otra cuestión es que la Ley del Suelo de 1998 dejara un vacío importante para justificar su incumplimiento, justo para la década de mayor movimiento inmobiliario de nuestro país.

Desde entonces la herramienta de ordenación del territorio ha resultado poco eficaz, hasta el momento presente, para reducir el riesgo de inundaciones en los aspectos para los que resulta más útil (disminución de la exposición y vulnerabilidad, por este orden). Los datos sobre los efectos de la aplicación de la normativa estatal y regional del suelo y ordenación del territorio en la disminución del riego natural son interesantes pero descorazonadores por el ritmo lento en que se consigue reservar suelo con riesgo para fines no residenciales ni infraestructurales.

No obstante, y dado que las medidas estructurales principales para la reducción del peligro de inundaciones ya se han realizado en nuestro país y que, merced a las normativas ambientales vigentes resulta –afortunadamente para el medio- cada vez más compleja la tramitación y aprobación de una gran obra de infraestructura hidráulica a estos efectos, la ordenación del territorio va a ser a medio y

largo plazo el procedimiento más eficaz para disminuir el riesgo natural en nuestro país. Y junto a ello la educación para el riesgo que, aún hoy, sigue siendo una medida esencial y escasamente desarrollada en España para reducir el riesgo natural.

La aprobación de la Ley del Suelo de 2008 abrió en España un proceso lógico, siguiendo lo desarrollado en otros países europeos, para la utilización de la ordenación territorial como herramienta jurídico-administrativa de reducción del riesgo natural. Frente a la anterior ley del suelo de 1998, que en este aspecto se incumplió sistemáticamente al no señalar el procedimiento necesario para la clasificación de un suelo como no urbanizable cuando existiera "riesgo natural acreditado", la Ley de 2008 (y texto refundido de 2015) obligaba a la elaboración de mapas de riesgos naturales como instrumento de acreditación jurídica del riesgo natural.

En términos generales, se podría decir que existe un catálogo bien definido de políticas y documentos vinculantes que, de ser aplicados de forma eficiente y ordenada, podrían alcanzar una mitigación de la curva de exposición y, a buen seguro, de la de pérdidas. Sin embargo, gran parte del fracaso de este grupo de medidas reside en la ausencia de una cartografía integral de delimitación de zonas inundables (Pérez et al., 2016).

La experiencia ha demostrado que la aplicación del art. 22.2 (texto refundido de la Ley de Suelo de 2015) no está resultando todo lo completa y ágil que se esperaba y la cartografía de riesgos naturales que aportan los planes de ordenación urbana aprobados con posterioridad al año 2008 resulta muy mejorable. No son muchos los municipios españoles que hayan aprobado su nuevo plan general de ordenación municipal con posterioridad al año 2008, que incorporen cartografía de riesgo natural precisa y completa, adaptada a los rasgos del medio físico y social de dichos municipios.

Los municipios, en la fase de elaboración y aprobación inicial de los planes urbanísticos, y los organismos regionales con competencias en urbanismo y ordenación territorial deberán extremar la vigilancia en el cumplimiento de la inclusión de cartografía e informe de riesgo en los documentos de planeamiento urbanístico, por la responsabilidad civil o penal que conlleva el posible desarrollo de un evento natural extremo con efectos no deseados en un municipio.

Y a ello se ha unido la mejora en la normativa de aguas que contiene preceptos que afectan a la planificación territorial y urbana puesto que en España la clasificación de un espacio geográfico como "área inundable" depende, de entrada, de una medida hidráulica (período de retorno de 500 años). Desde la ley de Aguas de 1985 y el Reglamento de Dominio Público Hidráulico de 1985 a la actualidad se han ido aprobando o transponiendo desde Europa (Directiva 60/2007) normas que contienen exigencias a contemplar en la determinación de perímetros de protección y salvaguarda del dominio público hidráulico. El último eslabón importante en este sentido ha sido la promulgación del RD 638/2016, por el que se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, y donde se contiene novedades importantes para la consideración y tratamiento del riesgo de inundaciones en la planificación territorial. Destacan, al respecto, los siguientes aspectos:

- Uso de fuentes y métodos hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos, fotográficos, cartográficos e históricos para delimitar el Dominio Público Hidráulico, sus áreas de influencia y las zonas inundables.
- La "zona de policía" (100 m. a ambos lados del cauce) puede ampliarse a la "Zona de Flujo Preferente" (prohibición y limitación de usos, según estado del suelo (rural o urbanizado).
- En las edificaciones en zona de flujo preferente o en zona inundable, el promotor deberá aportar "Declaración de responsabilidad" y "Certificado de inscripción en el Registro de la propiedad".
- La "zona inundable" (período de retorno de 500 años) pasa a delimitarse además de con

criterios hidrológicos, con elementos geomorfológicos e históricos también.
- El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, derivado de la adaptación de la Directiva 60/2007 ha supuesto una labor importante de colaboración con administraciones autonómicas y locales. Se obliga a la publicidad de su existencia y consulta pública.

Se trata, sin duda, de una mejora importante para la integración de las normativas hidráulica y territorial con el objetivo de mejorar la reducción del riesgo de inundaciones en nuestro país.

Con estas premisas, la legislación española en esta materia debería, sin embargo, ir un poco más allá en el objeto de la regulación. Siguiendo el modelo francés con la normativa ambiental que impone la realización de planes de prevención de riesgos (PPR) en la escala local, es necesario que la consideración del alto riesgo de inundación de un área suponga no sólo restricciones de usos futuro del suelo en las áreas no actuadas, sino desalojo de espacios urbanizados con esta consideración, bien con medidas directas de expropiación o canje de terrenos o, al menos en una primera fase, con la calificación de estas áreas con una condición de "zonas de sacrificio" que no puedan renovar su condición de áreas con uso residencial, comercial o de equipamiento, en el futuro. La aprobación de la Ley de Costas de 2103 –y su reglamento de 2014- con su medida de ampliación de las concesiones durante varias décadas a los bienes situados en dominio público ha significado, sin embargo, una desafortunada lección para la disminución de áreas con alta exposición ante un peligro natural –temporales marítimos, en este caso- y una apuesta por la "propiedad" del suelo por encima de la salvaguarda de la vida de las personas.

Con todo, la planificación del territorio no va a tener efectos directos y palpables si no se cumplen las siguientes premisas:

- Elaboración científica rigurosa de la cartografía de riesgo natural, como instrumento básico de acreditación jurídica del riesgo. La autoría de un mapa de riesgo natural incluye un componente ético de elevada profesionalidad puesto que el trazado de la línea que limita un área de elevado riesgo implica, en última instancia, la salvaguarda de la vida de personas (Olcina y Diez-Herrero, 2017).
- Comprobación efectiva de la documentación incluida en los informes de sostenibilidad ambiental por parte de las administraciones encargadas de ello: local, en primera instancia, y regional, en la aprobación definitiva. La falta de mapas de riesgo natural o su deficiente elaboración debe ser motivo de paralización inmediata de un plan de ordenación territorial en cualquier escala de trabajo.
- Incorporación en las fases de tramitación administrativa de los planes territoriales, de profesionales especializados en análisis de riesgo para la evaluación detallada de la documentación referida a esta cuestión. Este aspecto, que puede parecer una cuestión gremial, resulta fundamental si se tiene en cuenta que en este tema estamos "jugando" con vidas humanas, con las implicaciones de responsabilidad civil y/o penal que conllevan estos procesos.
- Ampliación en las normativas del suelo y ordenación del territorio de la casuística para la clasificación de un área como espacio no apto para la urbanización, a las áreas ya indebidamente ocupadas, con la inclusión de supuestos de expropiación forzosa y canje de terrenos en casos de espacios con categoría de alto riesgo en la cartografía elaborada.

3. INFRAESTRUCTURA VERDE: HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE LOS RIESGOS CLIMÁTICOS

La expresión "infraestructura verde" no tiene una definición universalmente aceptada, debido a la variedad de finalidades en que ha derivado que su manejo en planificación territorial (AEMA, 2011). Algunos autores se refieren a la "infraestructura verde" como "concepto-paraguas" (Feria y Santiago, 2017), ya que abarca múltiples componentes a diferentes escalas, desde los anillos verdes en la escala urbana hasta las redes regionales, nacionales o supranacionales para la conservación de los hábitats naturales. Benedict y McMahon (2002), a su vez, definen la infraestructura verde como una red interconectada de espacios verdes que conserva los valores naturales y las funciones del ecosistema y proporciona beneficios asociados a las poblaciones humanas. Weber (2006), por su parte, describe la infraestructura verde como la presencia y distribución de características naturales en el paisaje que, además de favorecer los procesos ecológicos, contribuye también a la salud y el bienestar humanos. Los conceptos "naturales" de ecosistema y paisaje se combinan con aspectos básicos en el funcionamiento humano de las sociedades (salud, bienestar) (Lafortezza et al., 2013).

De manera que los aspectos de espacios verdes, paisaje, red y mejora de las condiciones de vida de las sociedades están detrás de la conceptualización habitual del concepto de infraestructura verde. Otros autores hacen hincapié en su utilidad como herramienta cartográfica en los procesos de planificación territorial (Elorrieta y Olcina, 2020).

A pesar de este diverso significado el concepto de infraestructura verde está teniendo una importante difusión en diferentes países desarrollados, entre ellos los integrantes de la Unión Europea. Aquí, desde que fuera introducido por el Libro Blanco de la Comisión Europea para la Adaptación del Cambio Climático (2009), varios países están llevando a cabo políticas en esta línea. La Estrategia Europea de Biodiversidad (Comisión Europea, 2011: 5) fijó como objetivo para el año 2020 garantizar que los ecosistemas y sus servicios se mantengan y mejoren "mediante el establecimiento de infraestructura verde y la restauración de al menos el 15% de los ecosistemas degradados".

Los primeros sistemas de parques en red del mundo se atribuyen a Frederick Law Olmsted, un arquitecto paisajista que ideó, en la segunda mitad del s. XIX, diferentes proyectos que trataban de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos en diversas ciudades de Estados Unidos. Entre sus propuestas hallamos grandes parques urbanos (de hecho, fue el diseñador del Central Park de Nueva York), vías verdes que unían los parques, o las llamadas reservas escénicas, entre otros. Además, gracias a sus conocimientos de ingeniería y de los procesos naturales, atribuyó a los parques urbanos una función reguladora para la reducción del riesgo de inundaciones.

A pesar de estos audaces antecedentes, no sería hasta los años 90 del s. XX cuando aparecería explícitamente la expresión infraestructura verde. Fue nuevamente en Estados Unidos, en un contexto de creciente preocupación por las implicaciones ambientales del fenómeno del *urban sprawl*. La infraestructura verde nació basada precisamente en aquella visionaria idea de Olmsted de una red interconectada de espacios verdes, cuyas funciones incluyen la gestión del agua. Esta noción inicial, no obstante, iría evolucionando hasta la actualidad, de manera que las funciones atribuidas a la infraestructura verde hoy en día abarcan un amplio abanico de servicios de abastecimiento, regulación y servicios culturales (CICES, 2019).

La Comisión Europea (2014: 7) la define como "una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos". Esta definición recoge los tres rasgos esenciales de la infraestructura verde que resultan comunes a la mayoría de las definiciones (AEMA,

2011): en primer lugar, la búsqueda de un alto nivel de conectividad entre los espacios que la componen; en segundo lugar, su vocación multifuncional (con funciones no sólo ambientales, sino también sociales y productivas); y, por último, la adopción de un enfoque estratégico para su planificación y gestión.

La infraestructura verde no es solo una red de espacios protegidos o de corredores ecológicos, se trata de un concepto que abarca mucho más territorio desde un prisma multiescalar, multifuncional y multisectorial (Calzada, 2019). Los elementos que componen la infraestructura verde son diversos, específicos de cada territorio y muy dependientes de la escala (Fernández de Gatta, 2018). En este sentido, las metodologías para la ordenación de la infraestructura verde suponen un salto cualitativo ya que superan la visión conservacionista tradicional (Feria y Santiago, 2017), que se centraba en limitar el uso de recursos y regular los usos del suelo, para pasar a adoptar una planificación más estratégica.

La infraestructura verde debe contar en los procesos de planificación territorial como herramienta cartográfica principal, a partir de la cual se determinan los suelos a conservar y mantener en su estado actual -con sus distintos niveles de protección-, y se ordenan los nuevos crecimientos urbanísticos o de infraestructuras y equipamientos que pretenden mejorar el orden de cosas existentes en un espacio geográfico, bajo criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social. Este es, sin duda, el valor aplicado principal de esta metodología de planificación territorial: convertirse en un eficaz servidor de datos cartográficos que agilice los procesos de ordenación territorial.

Para integrar la infraestructura verde en las políticas territoriales, desde un punto de vista instrumental, pueden contemplarse dos opciones: por un lado, pueden desarrollarse instrumentos específicos de ordenación para la infraestructura verde; por otro lado, puede incorporarse la infraestructura verde en los planes de ordenación territorial.

La infraestructura verde como herramienta para la ordenación del territorio debe integrar los diferentes elementos y recursos territoriales que componen la parte del medio natural de un espacio geográfico. Una propuesta de elementos integrantes de la infraestructura verde se contiene en la tabla adjunta (Tabla 1).

La difusión del concepto de infraestructura verde ha sido considerablemente rápida en el contexto internacional y particularmente en el europeo, donde, además de una larga trayectoria de políticas ambientales, existe una preocupación importante por las transformaciones recientes de los usos del suelo. Los estudios de la Agencia Europea de Medio Ambiente revelan que el territorio europeo está padeciendo un progresivo proceso de pérdida de biodiversidad y de artificialización del suelo, en el que, además, la superficie urbanizada crece en mayor proporción que la propia población urbana (AEMA, 2012), un dato que es un claro reflejo de un modelo de urbanización cada vez más disperso con repercusiones directas sobre la fragmentación del paisaje. Es en este contexto que la UE emprende diversos proyectos dirigidos a monitorizar y proteger la biodiversidad y los paisajes europeos, así como a ordenar la infraestructura verde.

	COMPONENTE
AMBIENTALES	–Espacios Naturales Protegidos de escala estatal, regional, local. –Áreas protegidas por instrumentos internacionales (Ramsar, Patrimonio de la Humanidad, Reservas de la Biosfera, Geoparques, así como los espacios adyacentes -Red de ecosistemas de interés (p.e. Red Natural 2000). –Espacios de la zona marina cuya delimitación, ordenación y gestión deba hacerse de forma conjunta con los terrenos litorales a los que se encuentren asociados. -Dominio público hidráulico y costero ("infraestructura azul"). –Espacios costeros de interés ambiental y cultural. –Montes de Dominio Público y de Utilidad Pública o Protectores, las áreas de suelo forestal de protección, y los terrenos necesarios para mantener la funcionalidad de las zonas forestales protegidas.
CULTURALES	–Espacios de elevado valor cultural (cuevas, yacimientos arqueológicos, regadíos históricos), incluyendo sus entornos de protección. -Áreas o edificaciones con valor patrimonial reconocido. –Áreas agrícolas de elevada productividad y funcionalidad.
CONECTORES	–Vías pecuarias. -Senderos.
RIESGOS NATURALES	–Zonas críticas respecto a probable incidencia de riesgos naturales directos e inducidos significativos (inundaciones, temporales costeros, deslizamientos, riesgos geológicos, incendios forestales).
CAMBIO CLIMÁTICO	-Áreas críticas con efectos destacados de los cambios en los elementos climáticos principales (subida de temperaturas, incremento de precipitaciones intensas, subida del nivel del mar en zonas costeras).

Tabla 1. Propuesta de componentes integrantes de la infraestructura verde en los procesos de ordenación del territorio. Fuente: elaboración propia.

La Estrategia Europea de infraestructura verde tiene como objetivo crear un marco robusto y propicio para fomentar y facilitar proyectos de infraestructura verde mediante los instrumentos financieros, políticos y jurídicos existentes. Así, consta de cuatro elementos principales: el fomento de la infraestructura verde en los principales ámbitos políticos de la UE, el apoyo a los proyectos de infraestructura verde, la mejora del acceso a la financiación de los proyectos de infraestructura verde, y la mejora de la información y fomento de la innovación. La Unión considera que es necesario impulsar la infraestructura verde desde la escala europea de manera que las actuaciones desde las escalas inferiores sean coherentes.

Desde el Observatorio ESPON se puso en marcha, en septiembre de 2017, el proyecto *GRETA - Green infrastructure: Enhancing biodiversity and ecosystem services for territorial development*, cuyo objetivo no era otro que hacer un análisis espacial de la infraestructura verde y los servicios ecosistémicos en las ciudades y regiones europeas. Dicho análisis espacial dejó de manifiesto patrones muy desiguales de distribución de la infraestructura verde potencial a lo largo de la UE, que se explican por factores como las condiciones climáticas y topográficas, la densidad de población, la distribución y gestión de los usos del suelo (García-Blanco, Carrao y Fons, 2019).

En definitiva, la UE ha buscado la integración de la infraestructura verde en las diversas políticas de la Unión, considerando esta infraestructura como sistema en los procesos de planificación y toma de decisiones (Gobierno de España, 2019). Así, la forma de promover el desarrollo de la infraestructura verde ha consistido en crear un marco favorable para fomentar y facilitar la realización de proyectos de infraestructura verde en el marco de los instrumentos jurídicos, políticos y financieros existentes (Fernández de Gatta, 2018). Como resultado de este impulso, la infraestructura verde es identificada específicamente como una de las prioridades de inversión en los Fondos de Cohesión, la Política Agrícola Común, el Horizonte 2020, los proyectos LIFE, el Fondo Europeo Marítimo y de Pesca o el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, lo que pone de manifiesto la incorporación transversal a diferentes políticas y programas.

Así pues, la Unión Europea ha adoptado la noción de infraestructura verde como una herramienta estratégica en el marco de las políticas de cohesión territorial, conservación de la naturaleza y fomento de la sostenibilidad urbana (Feria y Santiago, 2017). Asimismo, DG Regio publicó en 2013 una Guía para Inversiones de la Política de Cohesión en el Medio Natural y en la Infraestructura Verde, subrayando los múltiples beneficios de estas inversiones para la economía regional y aportando recomendaciones y ejemplos de buenas prácticas para desarrollar las inversiones en materia ambiental (Comisión Europea, 2013b). En definitiva, cumpliendo con las líneas de actuación de la estrategia de infraestructura verde, la UE no sólo ha realizado una reflexión conceptual, un diagnóstico de su estado y una apuesta por la inclusión de la infraestructura verde en la planificación desde una visión estratégica, sino que también le ha asignado instrumentos de financiación y recomendaciones de inversión específicas para los proyectos.

Este impulso proveniente de la esfera europea también se ha traducido en una considerable integración de la infraestructura verde en la planificación territorial de los Estados miembros (AEMA, 2011). Según los resultados del proyecto GRETA, los 32 estados miembros de ESPON incluyen la infraestructura verde en sus políticas públicas, más allá de las políticas propias dirigidas a la conservación de la biodiversidad, aunque solo 11 de ellos tienen políticas específicas de infraestructura verde a nivel nacional (García-Blanco, Carrao y Fons, 2019), entre los que podemos citar a Bélgica, Dinamarca, Francia, Alemania, Estonia, Irlanda, Hungría, Holanda, Reino Unido o Austria. De todas formas, el marco regulador, el sistema de gobernanza, la escala de aplicación y la trayectoria y enfoque de las políticas de protección de los ecosistemas y procesos naturales lógicamente difiere de un país a otro. Fuera de la UE también ha habido una difusión de la infraestructura verde, con especial incidencia en su lugar de nacimiento, Estados Unidos, donde se ha promovido la creación de instrumentos de planificación, financiación y también de investigación.

Las escalas regional y local también ofrecen buenos ejemplos de la incorporación de la herramienta de la infraestructura verde en la planificación territorial. Así, destacan las iniciativas desarrolladas en Gales (zona de Pumlumon), Flandes (cuenca del Schelde), la iniciativa Ekostaden Augustenborg (Suecia), o la recuperación de la antigua zona minera de Limburgo (parque nacional de Hoge Kempen), entre otras. Incluso se han llevado a cabo iniciativas supra-regionales y supra-estatales como la creación del corredor “Alpes-Cárpatos” a lo largo de 120 km., o del “Cinturón Verde europeo” desde el Mar de Barents al Mar Negro, atravesando 23 países. En España son destacadas las actuaciones que han apostado por el desarrollo de infraestructura verde en áreas urbanas (Vitoria-Gasteiz, Zaragoza) o en espacios regionales (País Vasco, Comunidad Valenciana).

Hay dos aspectos recientes de la planificación urbana que han cobrado protagonismo como elementos de la infraestructura verde en la escala local, en el marco del actual proceso de calentamiento climático: el desarrollo de sistemas de drenaje sostenible (verdeamiento de cursos fluviales urbanos; parques inundables; depósitos pluviales) y las acciones para la mejora del confort térmico que eviten los efectos del calor urbano, especialmente en verano (tejados verdes, fachadas verdes, manzanas

verdes). Y de cara al futuro, los efectos del cambio climático se van a incorporar también como elementos de infraestructura verde en las escalas regional y local, a partir del empleo de modelos cada vez más ajustados (Vera, Olcina y Sainz, 2019). Y en un doble sentido: el propio proceso de cambio climático y sus efectos en los elementos climáticos (cambios en las temperaturas y la precipitación) y el incremento previsto de las manifestaciones atmosféricas extremas. De manera que se deberán incorporar a la infraestructura verde a efectos de planificación territorial regional y local, la subida del nivel del mar en áreas costeras, las modificaciones en las áreas inundables, el incremento de temporales marítimos y sus consecuencias en la franja litoral, las sequías y su impacto en el abastecimiento urbano de agua, entre otros.

4. ORDENACIÓN DEL TERRITORIO E INFRAESTRUCTURA VERDE PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO NATURAL Y EL CAMBIO CLIMÁTICO: UN EJEMPLO DE BUENA PRÁCTICA

Como se ha señalado, la infraestructura verde se maneja en un doble sentido, complementario, como herramienta para la ordenación sostenible de los territorios: como conjunto de infraestructuras urbanas diseñadas bajo criterios de sostenibilidad para la evacuación de aguas pluviales y como herramienta cartográfica para la planificación territorial sostenible.

Varias ciudades del mundo han diseñado sistemas sostenibles para la circulación de aguas pluviales (SDUS), a partir de la construcción de colectores de gran capacidad, de instalación de tanques de tormenta o diseño de parques inundables para reducir la peligrosidad de inundaciones urbanas.

Por su parte, comienzan a incorporarse elementos para la gestión del riesgo y del cambio climático en los procesos de planificación territorial a partir del empleo de la infraestructura verde. Los aspectos que de forma específica debe incorporar la infraestructura verde en la planificación urbana y territorial para reducir los efectos del calentamiento climático son los siguientes: a) aumento de temperaturas y pérdida del confort térmico, cuyos efectos pueden mitigarse a partir de medidas de diseño urbano como el aumento de parques públicos, de espacios verdes en viviendas (terrazas y fachadas verdes): b) subida del nivel del mar en áreas litorales, cuyos efectos deben reducirse con acciones estructurales, en algunos casos, y con planificación territorial (regulación de usos en la línea costera, desocupación de primeras líneas de costa). Y c) cambios en las precipitaciones, con incremento de su intensidad y de su irregularidad, lo que obliga a diseñar espacios para el drenaje de aguas de gran capacidad, así como depósitos de almacenamiento de agua de mayor capacidad que los existentes para garantizar el abastecimiento de las demandas urbanas.

Todo ello debe basarse en la elaboración de modelos de comportamiento de los elementos climáticos o ambientales (nivel del mar) rigurosos y que permitan la actualización periódica de las proyecciones de cara a su aplicación en la planificación territorial (Fig. 2).

Un elemento fundamental para incorporar el cambio climático y los riesgos asociados en los procesos de planificación territorial es el mapa. En efecto, la infraestructura verde debe contener cartografía de detalle escalar. En muchos países, el mapa se ha convertido en el documento de acreditación legal de la condición de riesgo de un territorio objeto de planificación. Un mapa de riesgo de inundación es un documento clave para la clasificación urbanística, de ahí que su elaboración requiera precisión y detalle. No es un mapa de peligrosidad, como ha sido habitual elaborar en los análisis del riesgo con finalidad urbanística; el mapa de riesgo incluye peligrosidad y agrega la vulnerabilidad social, económica y patrimonial. La escala de elaboración debe adaptarse a las tramas urbanas y para ello es necesario, además de ajustes cartográficos, la realización de trabajo de campo para confirmar los resultados que ofrecen los portales cartográficos de las administraciones (Olcina y Díez, 2017). Las administraciones competentes en materia urbanística deben velar porque los mapas de riesgo natural

que acompañen los documentos de planeamiento urbanístico estén elaborados con los criterios de rigor y en la escala idónea para el espacio geográfico objeto de transformación. Lo ideal es que el equipo redactor de un documento de planeamiento urbanístico elabore cartografía propia de riesgo que fusione, en su caso, lo contenido en los mapas oficiales de riesgo. En Europa, por ejemplo, los mapas oficiales de riesgo de inundación deben estar adaptados a lo señalado por la Directiva 60/2007. Y a ellos se han sumado iniciativas de las administraciones regionales en los estados miembros que han completado y mejorado los requisitos cartográficos de la Directiva. Todo mapa, además, debe acompañarse de una memoria explicativa del procedimiento de su elaboración y de los criterios escogidos para determinar los niveles de riesgo. Y debe estar elaborado por profesionales competentes en esta materia; básicamente especialistas formados en geografía, geología o hidrología.



Figura 2. Aspectos del cambio climático y de los riesgos climáticos que pueden incorporarse a la infraestructura verde en los procesos de ordenación territorial. Fuente: elaboración propia (imagenes tomadas de los visores cartográficos en abierto de Climate Central y Patricova).

La Comunidad Valenciana, en la costa mediterránea de España es, sin duda, el "espacio de conflicto", de interés económico, en materia de planificación territorial y urbanística, al concentrar el porcentaje mayor de población y de actividades económicas, en particular el turismo de sol y playa, motor económico esencial de la economía valenciana (Ariño & García, 2018). No es de extrañar, de este modo, que la Comunidad Valenciana encabece la lista de regiones españolas de agresiones al espacio litoral, lo que manifiesta la necesidad de una protección efectiva de la franja litoral y de una gestión real del territorio. Esta comunidad autónoma inició una nueva etapa en los procesos de ordenación territorial de escala regional y subregional bajo criterios de sostenibilidad en 2011, con la aprobación de la Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana (ETCV). La Estrategia Territorial de la Comunidad Valenciana (Generalitat Valenciana, 2011) señala que uno de los objetivos principales de la política de paisaje es definir la infraestructura verde que se define la infraestructura verde como una herramienta clave de planificación territorial que debe orientar los crecimientos urbanísticos del futuro preservando el territorio de mayor valor que debe quedar fuera de este proceso urbanizador.

Pero la plasmación concreta del uso de la infraestructura verde como herramienta principal de la

ordenación del territorio en la Comunidad Valenciana ha venido de la mano de la redacción y aprobación del PATIVEL, Plan de Acción Territorial de Infraestructura Verde del Litoral de la Comunidad Valenciana (Generalitat Valenciana, 2018).

El PATIVEL es un instrumento de ordenación del territorio de ámbito supramunicipal diseñado desde la urgencia y el pragmatismo para tratar de conseguir la rápida protección de determinados suelos de clara apetencia económica, mediante la aplicación de los principios y filosofía que propone la ordenación de la infraestructura verde.

Las áreas de protección seleccionadas pretenden evitar la consolidación de continuos edificados y de barreras urbanas; esto es, se intenta conservar las últimas ventanas de suelo potencialmente urbanizable que están sin urbanizar en la costa valenciana. Y ello bajo una doble finalidad: la protección y conservación de paisajes y entornos naturales, pero también la utilización de esta protección como oferta turística de calidad.

Acorde con los principios de ordenación integrada del espacio litoral y no solo de la estricta franja costera, este plan afecta a 3 ámbitos (ver Fig. 3) definidos a partir de su distancia, tierra adentro, de la línea de costa (Generalitat Valenciana, 2018):

a) *Ámbito estricto*, que comprende los suelos de los municipios litorales situados en la franja de 500 metros de amplitud medida en proyección horizontal tierra adentro desde el límite interior de la ribera del mar y coincidente con el área de influencia de la legislación de costas.

b) *Ámbito ampliado*, hasta los 1.000 metros de amplitud medida en proyección horizontal tierra adentro desde el límite interior de la ribera del mar, que dota de refuerzo y continuidad ecológica, funcional y visual a los suelos definidos en el apartado anterior y garantiza la amortiguación de los impactos sobre los mismos.

c) *Ámbito de conexión*, hasta los 2.000 metros de amplitud medida en proyección horizontal tierra adentro desde el límite interior de la ribera del mar, donde se analizará, ordenará y garantizará la conectividad ecológica y funcional del espacio litoral con el resto del territorio.

En el PATIVEL se han aplicado los componentes de la infraestructura verde definidos inicialmente en la Estrategia Territorial de la Comunidad Valenciana, que se estructura en una serie de componentes principales que forman los pilares básicos (en esencia, los espacios naturales con protección), unos servicios ambientales (forestales y agrícolas), unos espacios de especial atención (contaminación, riesgos), unos conectores y una infraestructura verde de escala urbana (parque, paseos, plazas). No obstante, se han incorporado algunos nuevos, como criterio para la delimitación de los ámbitos de protección: los espacios de la zona marina, los espacios costeros de interés ambiental y cultural, y las áreas de influencia del cambio climático en la franja litoral (subida del nivel del mar, áreas de inundación por incremento de episodios de crecida fluvial). En este último aspecto, el PATIVEL resulta novedoso en el conjunto de España. Para ello ha tenido en cuenta, entre otros, el Informe de efectos del cambio climático en la costa española, avalado por el Ministerio de Transición Ecológica (Losada et al., 2014), para estimar la evolución de la costa valenciana en un doble sentido: erosión por deriva litoral y efectos de temporales marítimos. Por su parte, el tramo final de cauces fluviales (ríos y barrancos), de naturaleza peligrosa por su potencial para desarrollar episodios de crecida e inundación, se considera espacio de conexión ecológica, de obligatoria ausencia de ocupación; de manera que el riesgo se transforma en recurso, en una interpretación, asimisma novedosa, de la incorporación de este componete ambiental en los procesos de ordenación territorial (Fig. 3).



Figura 3. Mapa de infraestructura verde en el PATIVEL (sector Vinaroz-Benicarló, provincia de Castellón). Los cauces de rios y barrancos son considerados como corredores de conexión ecológica. El riesgo se transforma en recurso. Fuente: PATIVEL, Generalitat Valenciana (2018).

El PATIVEL ha delimitado 52 áreas que deben preservarse libres de edificación, como piezas clave de la infraestructura verde del litoral (Generalitat Valenciana, 2018) y que suponen, además de la protección de áreas que ya estaban declaradas como suelo no urbanizable, la desclasificación urbanística de 1.426 has de suelo en la franja litoral. Es decir, de suelos que podrían haberse urbanizado (Vera-Rebollo & Olcina, 2017). En su conjunto, el PATIVEL prevé la protección de un total de 7.500 ha del litoral de la región, cifra que integra el 12% de los suelos que aún no han sido urbanizados en la franja de 500 m desde el límite interior de la ribera del mar.

5. CONCLUSIONES

La sostenibilidad territorial es una apuesta irrenunciable de las sociedades avanzadas. La ordenación del territorio es una medida eficaz para la gestión sostenible de los territorios. Todo proceso de ordenación territorial debe partir del análisis detallado del medio físico, entendido como sistema, con sus recursos y sus riesgos. Este principio se reafirma en el contexto actual de cambio climático, en el que los modelos están señalando una elevada probabilidad de desarrollo de eventos extremos en las próximas décadas. De manera que los territorios deben adaptarse a estas previsiones a fin de minimizar sus efectos.

La infraestructura verde, concepto originado a principios del siglo XX, ha sido recuperado en los últimos años en un doble sentido: bien como conjunto de actuaciones estructurales llevadas a cabo en medios urbanos para reducir, con infraestructuras “blandas” los riegos asociados a las inundaciones; o como herramienta de trabajo en la planificación territorial basada en la elaboración de cartografía de apoyo para la decisión en la asignación de nuevos usos en el suelo.

Entendida como herramienta para la planificación territorial sostenible, va adquiriendo protagonismo en los procesos de asignación de usos en el suelo, en las diferentes escalas de planificación. La elaboración de sistemas de información territorial en la elaboración de planes territoriales permite incorporar capas de información integrantes de la infraestructura verde de un espacio geográfico. Además, en los últimos años se están incorporando los efectos del cambio climático y de los riesgos naturales como elementos para la toma de decisiones en la asignación de usos en el suelo, a partir del empleo de los modelos cartográficos. El mapa se ha convertido en un elemento de acreditación administrativa necesario para la adaptación de los territorios al riesgo natural y el cambio climático.

Europa ha hecho una apuesta decidida por el empleo de la infraestructura verde en la planificación territorial. Se han desarrollado ejemplos de buenas prácticas en diferentes países europeos para el diseño de infraestructuras verdes en el ámbito regional y local. Y en algunos casos se han incorporado los procesos de peligrosidad natural y de cambio climático como criterio para la asignación de usos en el suelo. Para ello es necesario el desarrollo de proyecciones y modelos con base cartográfica que muestren los efectos esperados en el medio y largo plazo en un territorio.

La ordenación del territorio, con criterios de reducción de los efectos del cambio climático y de los peligros naturales, es una estrategia positiva de adaptación del espacio geográfico a las consecuencias de estos dos procesos físicos, pero con una incentivación de su grado de riesgo por parte del ser humano. El cumplimiento de los acuerdos internacionales de lucha contra el cambio climático (Acuerdo de París) y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en lo que respecta a la conservación y gestión sostenible de los territorios y de adaptación al cambio climático, tienen en la infraestructura verde un procedimiento de intervención en la planificación territorial respetuosa con el medio ambiente, con sus cambios previstos por el cambio climático y con su funcionamiento a veces extremo.

REFERENCIAS

- Agencia Europea del Medio Ambiente, AEMA. (2011). *Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems*. Unión Europea, Luxemburgo.
- Ariño, A. (dir.) & Garcia, P. (coord.). (2018). *La sociedad valenciana en transformación (1975-2025)*. Publicaciones de la Universitat de València, Valencia.
- Benedict, M. A & McMahon, E. T. (2002). Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 20, 12-17.
- Breuste, J., Artmann, M.; Li, J. & Xie, M. (2015). Introduction (special Issue on Green Infrastructure for Urban Sustainability). *Journal of Urban Planning and Development*, 141 (3).
- Burriel de Orueta, E. L. (2009). La planificación territorial en la Comunidad Valenciana (1986-2009). [En línea]. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias sociales*, XIII (306). http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-306.htm
- Calzada, P. (Dir.). (2019). *Guía de infraestructura verde municipal*. [En línea]. Red de Gobiernos Locales + Biodiversidad, Federación Española de Municipios y Provincias, Asociación de Empresas de Gestión de Infraestructura Verde, Asociación Española de Parques y Jardines Públicos. http://www.redbiodiversidad.es/sites/default/files/GUIA_Biodiversidad_CAPITULOS1_5.pdf
- Comisión Europea. (2011). *Estrategia de la UE sobre la biodiversidad hasta 2020: nuestro seguro de vida y capital natura*l. Unión Europea, Bruselas.
- Comisión Europea. (2013). *Infraestructura verde: mejora del capital natural de Europa*. Unión Europea, Bruselas.
- Comisión Europea. (2014). *Construir una infraestructura verde para Europa*. Unión Europea, Bruselas.
- Comisión Europea. (2015). *Revisión intermedia de la Estrategia de la UE sobre la Biodiversidad hasta 2020*. Unión Europea, Bruselas.
- Comisión Europea. (2019). *Revisión de la aplicación de la política medioambiental. Informe de España*. Unión Europea, Bruselas.
- Elorrieta, B., Olcina, J. & Sánchez, D. (2016). La sostenibilidad en la planificación territorial de escala regional. *Cuadernos Geográficos*, 55 (1), 149-175.
- Farinós, J. & Elorrieta, B. (2017). La articulación territorial de España: cohesión a partir de una nueva gobernanza. En: J. Farinós y J. Olcina (Coords.), *Geografía regional de España. Espacio*

y comunidades: bases para una regionalización renovada del territorio español, 563-617. Tirant lo Blanch, Valencia.

- Feria, J. M. & Santiago, J. (2017). Naturaleza y ciudad. Perspectivas para la ordenación de la infraestructura verde en los planes territoriales metropolitanos en España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 74, 117-141.
- Fernández de Gatta, D. (2018). La Estrategia estatal de infraestructura verde y de la conectividad y restauración ecológicas: un nuevo instrumento para proteger la biodiversidad. *Actualidad Jurídica Ambiental*, 81, 57-120.
- García-Blanco, G., Carrao, H. y Fons, J. (2019). La Infraestructura Verde en beneficio del desarrollo territorial estratégico: ESPON GRETA. En: 9º *Congreso Internacional de Ordenación del Territorio: Planificación y gestión integrada como respuesta,* 514-531. FUNDICOT, Madrid.
- Generalitat Valenciana. (2011). *Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana*. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana, Valencia.
- Generalitat Valenciana. (2018). *Plan de Acción Territorial de la Infraestructura Verde del litoral*. Consellería de Vivienda, Obras Públicas y Vertebración del Territorio de la Generalitat Valenciana, Valencia.
- Gobierno de España. (2019). *Estrategia Estatal de Infraestructura Verde y de la Conectividad y la Restauración Ecológ*icas. Borrador mayo 2019. [En línea]. Ministerio para la Transición Ecológica, Gobierno de España, Madrid. https://www.miteco.gob.es/images/es/borradoreeivcre_infopublica_tcm30-497133.PDF
- Jones, M. & Stenseke, M. (2011). *The European Landscape Convention: Challenges of participation*. Springer, Dordrecht.
- Lafortezza, R., Davies, C., Sanesi, G. & Konijnendijk Van den Bosch, C. 2013. Green Infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 6, 102-108.
- Losada, I., Izaguirre, C. & Diaz, P. (2014). *Cambio climático en la costa española*. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Mell, I. C. (2008). Green Infrstructure: concepts and planning. *FORUM Ejourn*al, 8, 69-80.
- Vera-Rebollo, J. F. & Olcina, J. (2017). *Análisis de la coherencia metodológica y de los datos utilizados en la memoria justificativa del PATIVEL* [inédito]. Conselleria de Vivienda, Obras Públicas y Vertebración del Territorio de la Generalitat Valenciana y Universidad de Alicante.
- Vera-Rebollo, J. F.; Olcina, J. & Sainz-Pardo, A. (2019). La incorporación de la infraestructura verde en la ordenación territorial. El plan de acción territorial de la infraestructura verde del litoral de la Comunidad Valenciana, PATIVEL. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, LI (200), 467-490.
- Weber T., Sloan, A. & Wolf, J. (2006). Maryland's Green Infrastructure assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. *Landscape and Urban Planning*, 77(1-2), 94-110.

EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA: RETOS FUTUROS

Teodoro Estrela Monreal
Director General del Agua, Secretaria de Estado de Medio Ambiente
Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
testrela@miteco.es

RESUMEN

En España se ha venido produciendo un cambio en el enfoque tradicional de aplicación de medidas estructurales de defensa frente a las inundaciones a otro basado en la aplicación de medidas de gestión. Esta evolución tuvo un punto de inflexión en los años 80 del siglo pasado, como consecuencia de las graves inundaciones ocurridas en el Levante y en el País Vasco, lo que significó el inicio de los trabajos de documentación de las inundaciones históricas por Protección Civil, la puesta en marcha del Programa SAIH en los Organismos de Cuenca o el establecimiento de las bases técnicas para la ordenación de las zonas inundables. Un cambio cualitativo en la gestión de las inundaciones tuvo lugar como consecuencia de la entrada en vigor en el año 2007 de la Directiva 2007/60, de evaluación y gestión de los riesgos de inundación, que ha supuesto una profunda modificación del marco regulador de la gestión tradicional de las avenidas e inundaciones. Los elementos fundamentales de esta Directiva son la evaluación preliminar del riesgo de inundación, la elaboración de mapas de peligrosidad y de riesgo y la elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI). Todo ello ha contribuido a que las inundaciones en España pasaran de ser gestionadas como situaciones de crisis a que se aplicasen enfoques basados en la gestión de riesgos, incluyendo los derivados del cambio climático (European Commission, 2014).

1. INTRODUCCIÓN

Según la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), el mayor número de desastres relacionados con el Clima se debe a las inundaciones. Los impactos económicos causados por las inundaciones han ido en aumento en todo el mundo, suponiendo serias amenazas a la vida humana y al bienestar de la sociedad. Además, los efectos negativos esperados por el cambio climático pueden incrementar estas amenazas. Por ello, la gestión de los riesgos causados por las inundaciones requiere coherencia de las políticas en todos los sectores, como la adaptación al cambio climático, la gestión del agua y la reducción del riesgo de desastres.

La OCDE (2019) sostiene que la buena gobernanza implica una mejora en el diseño, implementación y en el impacto de las políticas relacionadas con las inundaciones. Destaca también la importancia de incluir a todas las partes interesadas en la toma de decisiones.

España es un país que históricamente ha sufrido graves inundaciones. Las inundaciones son, año tras año el fenómeno natural que causa más daños, tanto a las vidas humanas como a los bienes y las actividades económicas. Es importante destacar que en los últimos 20 años han fallecido en España más de 300 personas debido a las inundaciones y los daños por inundaciones se han estimado en unos 800 millones de euros anuales.

Durante el siglo pasado las inundaciones se han venido gestionando en España como situaciones de emergencia o de crisis a las que había que hacer frente movilizando recursos de carácter

extraordinario y realizando obras estructurales una vez que las inundaciones habían ocurrido. En los últimos años, estas políticas han evolucionado desde un enfoque de gestión de la crisis y de desarrollo de actuaciones estructurales a otro basado en la gestión del riesgo y la aplicación de medidas de gestión y soluciones basadas en la naturaleza.

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA GESTIÓN DE LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA

A pesar de que la pluviometría media en España no es muy abundante, en ocasiones se presentan precipitaciones extraordinarias que provocan caudales extremos, que cuando se producen los desbordamientos del cauce provocan la inundación en sus márgenes, afectando a personas y bienes. La gran desproporción entre los caudales ordinarios y extraordinarios de algunos ríos hace que el problema de las inundaciones revista en España una especial gravedad, especialmente en la vertiente mediterránea, donde se han llegado a registrar, en pocas horas, valores de precipitación superiores al promedio de todo el año.

Aunque las crecidas son, en su origen, un fenómeno natural eminentemente hidrológico, en su desarrollo sobre zonas donde se asientan las actividades humanas se convierten en un problema territorial, con amplias repercusiones socioeconómicas. En las zonas inundables la intervención humana ha supuesto la modificación artificial de la respuesta de la llanura de inundación por las construcciones, cultivos, vías de comunicación y otros obstáculos, que pueden desviar la inundación hacia lugares que de forma natural no la hubieran sufrido. Existen incluso casos, como la Vega Baja del Segura, en los que la modificación de la llanura de inundación causó la modificación total del cauce del río, que abandonó el fondo del valle al ser desviado a media ladera, por el Cardenal Belluga para permitir el saneamiento del valle pantanoso y el establecimiento de colonos para poblar la antigua marisma (MIMAM, 2000).

La gestión de las inundaciones en España tuvo un punto de inflexión con las inundaciones que ocurrieron en los años 1982 y 1983 en el río Júcar y en el País Vasco, respectivamente. La rotura de la presa de Tous en el río Júcar tuvo lugar en octubre del año 1982 y fue debida a unas lluvias muy intensas de media-gran escala que provocaron unos caudales punta a la entrada de la presa de 10.000 m^3/seg y una inundación que afectó a unas 200.000 personas y causó 8 víctimas (MIMAM-CEDEX, 1998; CHJ, 2000). Los daños materiales fueron también muy elevados, estimándose en 1.500 M€ del año 2.000. Casi un año después, en agosto de 1983, más de un centenar de localidades vascas fueron declaradas zona catastrófica, después de que unas incesantes lluvias provocasen inundaciones generalizadas en todo el territorio del País Vasco. El número de víctimas fue superior a 30 y los daños materiales se estimaron en 1.200 millones de euros.

Consecuencia de las inundaciones anteriores fue el desarrollo de lo que se denominó Programa SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica), cuyo objeto inicial era disponer de un sistema de previsión y gestión de crecidas en los Organismos de cuenca. El comienzo de este Programa SAIH tuvo lugar en la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), ámbito territorial en el que se encontraba la presa de Tous. Posteriormente el SAIH tuvo su extensión progresiva hacia otras cuencas. En la crecida del Júcar que tuvo lugar en 1987 ya se recibieron los primeros datos oficiosos del Programa SAIH en la CHJ, los cuales fueron muy relevantes para el estudio de esta inundación.



Figura 26. Puntos de control del SAIH de los Organismos de cuenca.

El SAIH es un sistema de Información en tiempo real, que proporciona datos cinco minutales de las principales variables hidrometeorológicas e hidráulicas en las cuencas. Esta información es esencial para la gestión y alerta de crecidas y en los últimos se ha venido utilizando cada vez más para la gestión de los recursos hídricos. El SAIH captura datos mediante sensores ubicados en puntos de control distribuidos por toda la cuenca y los transmite al centro de control en los Organismos de cuenca, donde se procede al tratamiento, interpretación y análisis de la información. En la actualidad el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) está compuesto por 1.462 pluviómetros, 925 sensores de aforos en ríos y 848 sensores en embalses (Figura 1).

Un año después de la rotura de presa de Tous, en 1983, la Comisión Nacional de Protección Civil constituye la Comisión Técnica de Emergencia por Inundaciones (CTEI), con la participación de los Órganos de la Administración del Estado competentes. Entre los años 1983 y 1986, entre los trabajos de la CTEI destacan los estudios sobre inundaciones históricas en la España Peninsular, donde se identifican 2.588 inundaciones. Esta información es muy valiosa para establecer la frecuencia e intensidad de las inundaciones en un determinado territorio y conocer el desarrollo y evolución de las inundaciones y sus principales efectos.

Por otra parte, consciente de la importancia de la ordenación de zonas inundables para disminuir los efectos negativos de las inundaciones, la Ley de Aguas de 1985 y el Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RDPH) de 1986 establecieron una zonificación de la llanura de inundación, definiendo los conceptos de Dominio Público Hidráulico (DPH) y cauce, zona de servidumbre y zona de policía. También entonces se definió la zona inundable, que es el terreno cubierto por las aguas por la avenida de 500 años.

Conviene también indicar que la zonificación de áreas inundables recogida en la ley de Aguas y en el RDPH no es la única existente. La Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones exige como requisito para los Planes de Comunidad Autónoma ante el Riesgo de Inundaciones y los Planes de Actuación de Ámbito Local, que en ellos se incluya la clasificación de las zonas inundables en función del riesgo.

En los últimos años del siglo pasado, desde el año 1.995, la Dirección General de Protección Civil ha llevado a cabo la elaboración del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH), con el objetivo de sistematizar y homogeneizar la recopilación de datos sobre inundaciones históricas a nivel nacional, y también de facilitar y asegurar su inmediata actualización con nuevos episodios de

inundación. Tras años de trabajo, en septiembre de 2017 se completó el CNIH para todo el territorio nacional.



Figura 27. Página web del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas de Protección Civil

En este recorrido por lo que ha sido la evolución de la gestión de las inundaciones en España, es también relevante destacar como al inicio del presente siglo, el Libro Blanco del Agua en España (LBAE) (MIMAM, 2000) recogió una serie de criterios básicos que deberían regir las actuaciones de defensa frente a las inundaciones para asegurar su eficacia en la reducción de daños, lo que supuso un cambio importante en los criterios seguidos en la gestión de las inundaciones hasta esa fecha. Entre ellos cabe destacar los siguientes:

- Coordinación. Se hace necesaria una actuación conjunta y coordinada de las distintas administraciones e instituciones implicadas.
- Descentralización. Las áreas inundables de primer orden pueden requerir una actuación desde la Administración central, pero en el resto de las zonas los problemas pueden ser resueltos por las Comunidades Autónomas, con asesoramiento de los Organismos de cuenca.
- Separación de daños. Es necesario el desarrollo de programas orientados a objetivos diferenciados. En los programas específicos para la reducción del número de víctimas las actuaciones sobre la red viaria y los sistemas de previsión y alerta deben jugar un papel fundamental. En los programas para la reducción de daños agrícolas se debe incidir en la creación de seguros agrarios.
- Realismo. Debe admitirse que el problema de las inundaciones no admite soluciones definitivas, por lo que siempre ha de aceptarse un cierto riesgo residual.
- Respeto al medio ambiente. Debe evitarse el deterioro injustificado de los ecosistemas fluviales, potenciando las medidas de tipo no estructural o de gestión. Cuando las medidas estructurales resulten imprescindibles, deberán buscarse soluciones lo menos agresivas posible que permitan minimizar el impacto sobre el medio ambiente.
- Prevención. Los problemas de inundabilidad deben ser prevenidos antes de que se requieran intervenciones futuras. Evitar la ocupación urbana de zonas inundables y orientar el crecimiento

de las ciudades hacia zonas seguras es el mejor método para evitar dichas intervenciones.

- Transparencia. Es preciso realizar un esfuerzo para presentar con realismo los riesgos asumidos y explicar con claridad los objetivos de las medidas adoptadas. Los mapas de riesgo deben ser divulgados y difundidos no sólo entre Administraciones y técnicos, sino también entre los ciudadanos.

También el LBAE se refiere a cuestiones específicas de gran importancia, como es la zonificación de las zonas inundables, donde propone que cuando sea necesario modificar la zona de policía, que con carácter general sigue un criterio métrico de 100 m a ambos lados del cauce, se adopte el criterio de hacerla coincidir con la vía de intenso desagüe, zona en la cual se produce la mayor concentración del flujo y consecuentemente el mayor riesgo. La vía de intenso desagüe se define de forma que pase por ella la avenida de 100 años sin producir una sobreelevación mayor que 0,3 m respecto a la elevación que se produciría con esa misma avenida considerando toda la llanura de inundación existente (Estrela y Témez, 1993; Témez, 2000).

Más tarde, en el año 2002 un Informe de la Comisión Especial del Senado sobre la Prevención y Asistencia en Situaciones de Catástrofe (Senado, 2002) recoge las ponencias y conclusiones de las jornadas parlamentarias sobre prevención de riesgos relacionados con el agua, donde expertos en el estudio y gestión de las crecidas e inundaciones participaron con la presentación de ponencias en temas tan relevantes como la planificación frente a los riesgos hidrológicos, el medio ambiente y los riesgos hidrológicos, la cobertura de riesgos y responsabilidades, los riesgos geológicos relacionados con el agua, el dominio público hidráulico y la protección civil ante el riesgo de inundaciones. Uno de los principales puntos de discusión durante las jornadas fue la ordenación de las zonas inundables mediante la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo. Todavía en aquellos años el cambio climático no tenía un papel relevante en los estudios de inundaciones y no fue por tanto objeto de estudio y discusión durante el desarrollo de las jornadas.



Figura 28. Informe de la Comisión Especial del Senado sobre la Prevención y Asistencia en Situaciones de Catástrofe del Senado de 2002.

Posteriormente, en enero de 2008, una modificación del RDPH, siguiendo las recomendaciones del LBAE (MIMAM, 2000), añadió en la zonificación de las áreas inundables la zona de flujo preferente, que se consideraba la unión de una zona de concentración de flujo (vía de intenso desagüe) y una zona donde se podían producir graves daños.

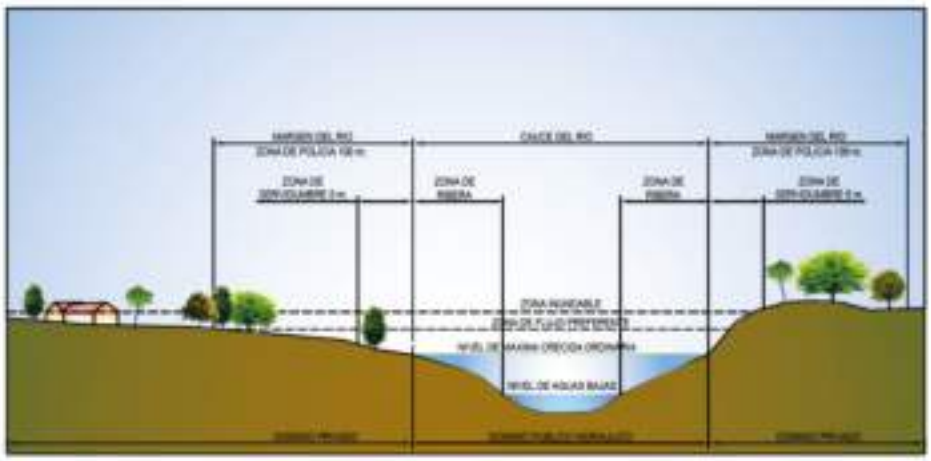


Figura 29. Zonificación del cauce y la llanura de inundación.

La realización de una cartografía de riesgo es un paso previo ineludible a la puesta en práctica de cualquier tipo de medida no estructural y por tanto es esencial para poder llevar a cabo una gestión eficaz de las zonas inundables. La relación entre cartografía de riesgo y las medidas de protección civil y de ordenación del territorio es indudable, por lo que la participación de las administraciones autonómica y local en estos trabajos cartográficos es necesaria.

Un ejemplo de participación de la administración autonómica lo constituyó el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), que fue aprobado por acuerdo de 28 de enero de 2003 del Consell de la Generalitat Valenciana. El objeto del PATRICOVA era dotar a la Comunidad Valenciana de un instrumento de ordenación, coordinación y protección territorial, encaminado a prevenir los riesgos de inundación mediante el establecimiento de una serie de determinaciones dirigidas a minorar los efectos socioeconómicos y urbanísticos-territoriales de las actuaciones que se produzcan sobre terrenos afectados por riesgo de inundación apreciable (COPUT, 2003).

En 2015 se procedió a la revisión del PATRICOVA, adaptándolo a la Directiva 2007/60/EC de Inundaciones, incorporando el riesgo de inundaciones costero y geomorfológico, así como mapas mucho más detallados del riesgo de inundaciones, como el que se muestra en la Figura 5.



Figura 30. Mapas de riesgo del PATRICOVA de 2015.

Un cambio cualitativo en la gestión de las inundaciones en España se produce como consecuencia de la entrada en vigor en el año 2007 de la Directiva de inundaciones de la Unión Europea, que supuso una profunda modificación del marco regulador de la gestión tradicional de las avenidas e inundaciones.

3. LA DIRECTIVA DE INUNDACIONES Y SU TRASPOSICIÓN

La Directiva 2007/60 de Inundaciones representa un nuevo enfoque en la gestión del riesgo de inundación en la Unión Europea desde una óptica integrada que coordina la política de planificación hidrológica con la planificación de la gestión del riesgo de inundación en la Demarcación Hidrográfica. El cambio en la gestión del riesgo de inundación que ha traído la Directiva Europea de inundaciones constituye uno de los principales hitos de la política del agua en España en los últimos años.

Esta Directiva fue traspuesta en España mediante el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión del riesgo de inundación, que tiene como principales objetivos obtener un adecuado conocimiento y evaluación de los riesgos asociados a las inundaciones y lograr una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y la sociedad para reducir las consecuencias negativas de las inundaciones.

La Directiva de Inundaciones establece las siguientes tareas, que en España se realizan en el ámbito de cada demarcación hidrográfica y se revisan periódicamente cada 6 años:

- Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) que conlleva la identificación de los tramos de ríos y de costa con mayor riesgo de inundación, lo que se conoce como Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs). Este trabajo se realizó en el año 2011 y durante los años 2018 y 2019 se ha procedido a su revisión y actualización.
- Elaboración de los Mapas de peligrosidad por inundación y de riesgo de inundación en las ARPSIs seleccionadas en la EPRI. Este trabajo se realizó en el año 2013 y entre 2019 y 2020 se ha procedido a su revisión y actualización. Ya se han aprobado en la mayoría de las demarcaciones y están disponibles en el visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)

(sig.miteco.gob.es/snczi).

- Elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI). Los primeros planes fueron aprobados en 2016 y se va a comenzar su revisión a partir de septiembre de 2020 y durante 2021, proceso que está previsto concluya con su aprobación en diciembre de 2021.

La aplicación de la Directiva de Inundaciones requiere una elevada coordinación entre la Administración General del Estado (AGE) y las Administraciones Autonómicas y Locales. Así la AGE, a través de los Organismos de cuenca, tiene entre sus principales tareas la planificación del uso del agua y de la gestión del riesgo de inundaciones, la gestión de los sistemas de previsión de crecidas e inundaciones, la construcción y explotación de las principales infraestructuras de prevención y mitigación y las regulaciones y medidas en cauce, zona de policía y zona de flujo preferente. Por su parte, las restantes administraciones se encargan de la planificación del uso del suelo, incluyendo zonas inundables (excluida los cauces, zonas de policía y zonas de flujo preferente) y de la implantación de algunas medidas no-estructurales, como la gestión de áreas forestales o el diseño de infraestructuras verdes.

4. EL SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES

En España, el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) se introduce en el Reglamento de Dominio Público (RDPH) en el año 2008 y se crea en el año 2015. Desde entonces se puede consultar en la web del Ministerio (sig.miteco.gob.es/snczi) la cartografía de los mapas de peligrosidad y riesgo a distintas escalas y con ortofotos, así como los cauces de dominio público hidráulico y la zona de flujo preferente.

Los mapas de peligrosidad muestran información sobre los calados de la inundación, los caudales y velocidades máximas, el régimen de oleaje y de mareas, así como las zonas sometidas a procesos erosivos y las tendencias en la subida del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático. Esta información suele representarse para distintos escenarios de avenidas: las de alta probabilidad (periodos de retorno de 10 o 25 años), las de media probabilidad (periodo de retorno de 100 años) y las de baja probabilidad o escenario de evento extremo (periodo de retorno de 500 años).

Para cada uno de los escenarios anteriores se elaboran mapas de riesgo que, en los Estados miembros de la UE, de acuerdo con la Directiva de Inundaciones, deben incluir el número de habitantes y tipo de actividad económica potencialmente afectados, aquellas instalaciones que puedan causar contaminación accidental (industrias IPPC y Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales, EDAR), las zonas protegidas para la captación de aguas destinadas al consumo humano, las masas de agua de uso recreativo y las zonas para la protección de hábitats o especies que pueden resultar afectadas, así como cualquier otra información relevante del riesgo, tal como el transporte sólido y flujos de derrubios.

En la actualidad se está realizando la mejora del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), cuyos contenidos se actualizan periódicamente con los últimos estudios disponibles. Está previsto que el SNCZI sufra una importante actualización durante el tercer trimestre de 2020 al incorporar la revisión y actualización de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación recientemente aprobados. Además, se ha tratado de mejorar la metodología de elaboración de los mapas de riesgo, especialmente en el cálculo de población estimada en zona inundable y en la localización y clasificación de los elementos vulnerables, teniendo en cuenta las indicaciones de las autoridades de Protección Civil.

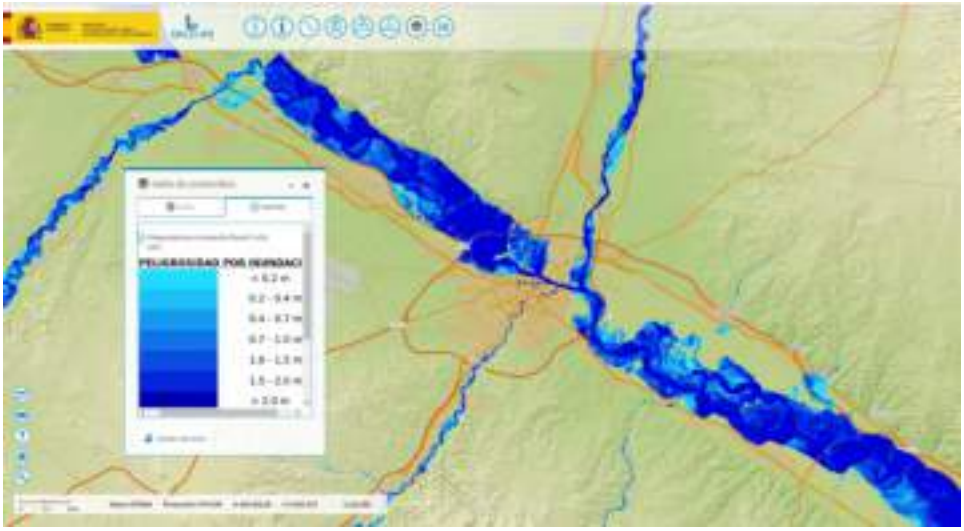


Figura 31. Mapa de peligrosidad del río Ebro en Zaragoza (avenida de 100 años). Fuente: Web del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

5. LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES

Los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) establecen objetivos para reducir los daños a personas, medioambiente, patrimonio cultural y actividades económicas. Abarcan todos los aspectos de la gestión del riesgo y se centran en la prevención, protección y preparación, incluidos la previsión de inundaciones y los sistemas de alerta temprana. Pueden incluir, la promoción de prácticas de uso sostenible del suelo, medidas de restauración hidrológico-agroforestal, mejora de la retención de aguas e inundaciones controladas. Los PGRI tienen como objetivo último lograr una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y la sociedad para reducir las consecuencias negativas de las inundaciones, basándose en los programas de medidas que cada una de las administraciones debe aplicar en el ámbito de sus competencias. Un elemento fundamental de los PGRI es el establecimiento de los programas de medidas que permiten reducir el riesgo frente a las inundaciones, partiendo de la cartografía de peligrosidad y riesgo. Las medidas estructurales requieren un análisis coste-beneficio previo.

La mayoría de los PGRI vigentes en España fueron aprobados mediante Real Decreto el 15-01-2016 y se redactaron en estrecha colaboración con las autoridades de Protección Civil Estatales y Autonómicas. En los PGRI se recogen más de 1.000 medidas con una inversión superior a los 800 millones de euros para el periodo 2016-2021 para todas las demarcaciones. Tal y como establece la Directiva, los programas de medidas de los PGRI contienen cuatro grupos de medidas: prevención, protección, preparación y recuperación.

Las medidas de prevención están diseñadas para anticiparse al problema. Por ejemplo, promoviendo políticas de ordenación del territorio y urbanismo, o actuaciones en conservación y mantenimiento de los ríos y del litoral. Entre este tipo de medidas destaca la aprobación en diciembre de 2016 del Real Decreto 638/2016, de modificación del Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH). Esta modificación ha establecido una normativa homogénea a escala nacional para desarrollar de forma segura las actividades proyectadas sobre zonas inundables. Dentro de este tipo de medidas se encuentra también la mejora del conocimiento y uno de los aspectos al que se está destinando un mayor esfuerzo es el estudio de los efectos del cambio climático. En colaboración con el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX, se está estudiando y actualizando el efecto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas diarias, sobre la ley de frecuencia de caudales máximos diarios y sobre la morfología de la cuenca y de los ríos.

En el ámbito de las medidas de protección los PGRI recogen las actuaciones materiales que ayudan a disminuir la peligrosidad de las avenidas. Se trata de proyectos de restauración fluvial, de actuaciones coordinadas con la gestión de los embalses en situación de avenidas, o de obras de drenaje en vías de comunicación que mejoren el desagüe de las avenidas. Este tipo de actuaciones tienen como principal objetivo reducir la peligrosidad y para ello se plantean medidas que contribuyen tanto al incremento de la capacidad del sistema para absorber la inundación y laminar la avenida (retranqueo o eliminación de motas, mejora de la conectividad lateral con las llanuras de inundación, etc.) como a la mejora o al mantenimiento del buen estado de las masas de agua y los hábitats riparios (EEA, 2016). Con relación a las obras estructurales, desde mediados de 2018 la Dirección General del Agua está realizando los estudios de viabilidad, coste-beneficio y priorización de las obras estructurales de defensa frente a inundaciones (como nuevos encauzamientos o presas de retención de avenidas) incluidas en los PGRI.

Los PGRI también contemplan medidas de preparación ante un episodio de inundación, mediante la mejora de los sistemas de aviso y alerta, tanto meteorológicas (AEMET) como hidrológicas (Organismos de cuenca) y el refuerzo de los protocolos de comunicación entre Administraciones y sectores afectados. Dentro de este tipo de medidas, el RDPH establece ciertos criterios constructivos en los casos en los que se permita la realización de nuevas edificaciones de carácter residencial. Como herramienta de aplicación de esta medida se encuentra la "Guía para la Reducción de la Vulnerabilidad de Edificios frente a Inundaciones" elaborada por la Dirección General del Agua y el Consorcio de Compensación de Seguros. Como continuación de la guía anterior, en noviembre de 2019 se publicaron cuatro guías de adaptación al riesgo de inundación: Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras, Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas, Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables y Sistemas urbanos de drenaje sostenible.



Figura 32. Portadas de las Guías de adaptación al riesgo de inundación.

Por último, se encuentran las medidas de recuperación, a desarrollar después de un episodio de inundación, con el fin de restablecer la normalidad lo antes posible. Son medidas como las relativas a la aplicación de los seguros o a la ejecución de obras de emergencia para restaurar elementos afectados. Existe además desde 2016 una colaboración entre la Dirección General del Agua y la Unidad Militar de Emergencias (UME) para el desarrollo de programas específicos de formación en materia de gestión de riesgos de inundación y realización de simulacros. Cabe destacar también la labor del sector del seguro en la gestión de riesgo de inundación. El Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) indemniza con una media de unos 200 millones de euros al año a los afectados por inundaciones que tengan bienes asegurados.

6. RETOS FUTUROS

A partir de la aprobación de la Directiva de inundaciones en 2007, se ha producido un impulso notable en las acciones de prevención y gestión del riesgo de inundación en España.

Algunas de las lecciones aprendidas durante los últimos años han sido: a) los mapas de peligrosidad y riesgo son un elemento esencial en la gestión del riesgo de inundaciones, b) no se puede eliminar completamente el riesgo de inundaciones y por tanto se necesita integrar el riesgo de inundaciones en el proceso de planificación urbana y territorial, evitando localizar los usos más vulnerables en las zonas con más peligrosidad (Estrela y Sancho, 2020), c) es necesario reforzar la cooperación entre las autoridades competentes en la gestión del riesgo de inundaciones y los programas de medida de los planes de gestión de los riesgos de inundación contribuyen a facilitar esa cooperación.

Sin embargo, a pesar de los avances realizados en los últimos años existen grandes retos para el futuro, que requerirán el esfuerzo por parte de todos los actores implicados en la gestión del riesgo de las inundaciones. A continuación, se muestran, para cada fase del riesgo (prevención, protección, preparación, recuperación), los principales retos y propuestas de acción:

Prevención

Es imprescindible realizar acciones para aumentar la percepción del riesgo de inundación entre todas las administraciones y agentes sociales. La autoprotección es un elemento clave para reducir los daños que producen las inundaciones y la consideración del riesgo de inundación en la ordenación del territorio debe contribuir a que estos daños no crezcan en el futuro. La adaptación al riesgo de inundación de las edificaciones y actividades económicas existentes en las zonas de riesgo de inundación es también una tarea esencial.

Es necesario mejorar el conocimiento sobre las características hidrometeorológicas que motivan las inundaciones y como pueden verse influenciadas por el cambio climático. Igualmente es necesario seguir mejorando las herramientas técnicas de modelización hidrológicas e hidráulicas y completar la cartografía de las zonas inundables de los principales cauces en España.

Protección

Es fundamental desarrollar labores de conservación y mantenimiento de presas y encauzamientos, profundizar en la optimización de su gestión y realizar una evaluación de los efectos del cambio climático en su funcionalidad en el futuro. Es necesario establecer un marco técnico adecuado para garantizar que las nuevas obras estructurales que se ejecuten se realicen con las máximas garantías técnicas, ambientales y sociales.

El desarrollo de proyectos que mejoren el estado ecológico de los ríos y que a su vez disminuyan el riesgo de inundación debe ser una prioridad de las distintas administraciones. La recuperación de la cubierta forestal y la realización de prácticas agroambientales adecuadas son también claves.

Se considera necesario abordar de forma generalizada un inventario de puntos sensibles en inundaciones y en especial de puentes y otras infraestructuras que, bien por su escasa capacidad hidráulica, o porque se vean seriamente afectados en situaciones de avenida, suponen puntos con una especial problemática. A partir de esta información, las distintas administraciones competentes deberán progresivamente mejorar el drenaje de estas infraestructuras.

Preparación

La reordenación, modernización y mejora de los sistemas de información hidrológica es una tarea esencial para mejorar el conocimiento de las distintas situaciones hidrológicas y, con ello, facilitar la toma anticipada de decisiones para poder disponer medidas que permitan reducir los impactos de las inundaciones.

En conveniente la creación de una estructura técnico-científica, que en coordinación con la AEMET y los Organismos de cuenca, sea capaz de generar previsiones y alertas a corto y medio plazo de crecidas e inundaciones y de sus efectos, de forma que las autoridades de Protección Civil, ciudadanos y agentes económicos puedan tener el tiempo suficiente para tomar medidas de autoprotección.

Es esencial dotar de medios y formación a los distintos agentes de protección civil y emergencias, de forma que todos los municipios con alto riesgo de inundación, así como las principales actividades económicas dispongan de planes de actuación plenamente operativos en caso de emergencia.

Recuperación

Tras un episodio de inundación, las distintas administraciones deben trabajar de forma ágil y coordinada para una pronta vuelta a la normalidad. Las obras de reconstrucción deben realizarse con mejoras en su diseño para minimizar fallos. Debe realizarse un informe que determine qué se debe mejorar o corregir para el futuro y así mejorar progresivamente.

Es necesario seguir mejorando los sistemas de seguros de forma que el proceso de gestión de las indemnizaciones sea lo más ágil y rápido posible.

REFERENCIAS

- CHJ (2000). *Plan Global frente a las inundaciones en la Ribera del Júcar. Propuesta de Actuación*.
- COPUT (2003). *Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana*. Generalidad Valenciana, Conselleria de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, Valencia.
- Estrela, T. y Témez, J. R. (1993). Planning criteria for flood areas in Spain. En: *Proc. XXV IAHR Congress*. Tokyo, Japan.
- Estrela, T. y Sancho, T. (2020). Gestionando inundaciones y sequías. Mejores prácticas y contribución de la ingeniería. *Revista de Obras Públicas*, 3616, 42-48.
- European Commission (2014). *Climate Impacts in Europe. The JRC PESETA II Project*. Joint Reserch Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Seville, Spain.
- European Environment Agency (2016). *Flood risks and environmental vulnerability. Exploring the synergies between floodplain restoration, water policies and thematic policies*. EEA Report, 1.
- European Union (2007). Directive on the assessment and management of flood risks, 2007/60/EC. European Union, Brussels.
- MIMAM (2000*). El Libro blanco del Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente, España, Madrid.

- MIMAM-CEDEX (1998). *Síntesis de las Avenidas del río Júcar en su llanura de inundación. Análisis de la situación actual y líneas de actuación. Incluido en el Convenio de colaboración entre la DGOHCA y CEDEX*.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente y Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (2017). *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2017). *Guía técnica de apoyo a la aplicación del reglamento del dominio público hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial*.
- Senado (2002). *Informe de la Comisión especial del Senado sobre la prevención y asistencia en situaciones de catástrofe. Ponencias y conclusiones de las jornadas parlamentarias sobre prevención de riesgos relacionados con el agua*. Departamento de Publicaciones del Senado, Madrid.
- Temez, J. R. (2000). Áreas inundables, zonas de dominio público y zonas de policía. Riesgos de inundación y Régimen Urbanístico del Suelo. En: *Jornadas sobre Riesgos de Inundación y Régimen Urbanístico del Suelo* (3 y 4 noviembre de 1999). Consorcio de Compensación de Seguros y Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- OECD (2019). *Applying OECD Principles on Water Governance to Floods: A Checklist for Action*. OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/d5098392-en

LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES EN ÁREAS URBANAS: DE RIESGO A RECURSO

María Hernández Hernández
Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Alicante, España
maria.hernandez@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-8823-0083

David Sauri Pujol
Departamento de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona, España
david.sauri@uab.cat
https://orcid.org/0000-0002-3618-7773

Álvaro-Francisco Morote Seguido
Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad de Valencia, España
alvaro.morote@uv.es
https://orcid.org/0000-0003-2438-496

RESUMEN

El uso de las aguas pluviales tradicionalmente ha sido un rasgo distintivo en las sociedades de base agraria en ámbitos semiáridos y representa el sistema más extendido para la conservación del suelo y agua (dos recursos escasos e imprescindibles para el desarrollo de la agricultura). También han ejercido una función menos conocida como es la laminación de las crecidas coincidiendo con precipitaciones de cierta intensidad horaria al derivar hacia colectores construidos expresamente para ello caudales circulantes por cauces fluviales. El abandono de estas prácticas a partir de los años sesenta del pasado s. XX, unido a las notables transformaciones territoriales acaecidas han acentuado una serie de riesgos, por ejemplo, el de inundación que, estos sistemas minimizaban y trataban de convertir en un recurso. El objetivo de esta investigación es analizar el uso de las aguas pluviales, consideradas estas bajo la óptica de flujos que se pueden valorizar y explotar en el marco de la economía circular y las denominadas *Nature Based Solutions* (NBS). Estos planteamientos reflejan, por un lado, el interés por el aprovechamiento del agua de lluvia; interés acentuado ante los efectos del cambio climático en estos territorios (incremento de las sequías y lluvias torrenciales). Y por otro, la importancia de profundizar en el conocimiento de estas prácticas tradicionales dada su capacidad para incrementar la resiliencia no solo, en ámbitos semiáridos.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de las aguas pluviales (también conocidas como turbias, riego de boqueras, nateros, gavias, etc.), ha sido la técnica tradicional utilizada para "recolección" del agua de lluvia en la región mediterránea, pero, también en otros territorios semiáridos. La aparición de técnicas similares en continentes no relacionados hasta tiempos relativamente recientes, lo resuelve Palerm (2002: 9) indicando que son fruto "de invenciones independientes, resultado de soluciones a la misma problemática; de la misma forma que la conducción del agua por canales es una invención independiente en regiones muy diversas". La cuestión no es baladí cuando esta organización viene a

representar un proceso de antropización del medio de considerable extensión, de milenaria historia, en muchos territorios semiáridos (Morales y Hernández, 2018). La restructuración de vertientes, en algunos casos, ha tenido repercusiones en la recuperación de paisajes, en la corrección de procesos geomorfológicos desde perspectivas de rectificaciones hidrológicas o incidencia en medios urbanizados recientemente, cuyos planificadores desconocían su existencia y utilidad. En los últimos años, su apreciación científica y utilitaria se revaloriza y constituye un desafío científico nada sencillo de solucionar que, en la actualidad, entronca con la práctica de la Geografía, la Antropología, la Historia Económica, la Arqueología del Paisaje, la Ingeniería (obras públicas, agrónomos y montes) y la Arquitectura (Hernández et al., 2016).

En las regiones semiáridas, los rasgos climáticos (precipitaciones exiguas, con unos totales anuales en torno a 300 mm, y espasmódicas, ya que la mayor parte del total anual puede concentrarse en unos cuantos episodios lluviosos) no ofrecían muchas posibilidades para que sobre ellos se diese un intenso proceso de ocupación humana, puesto que la indigencia pluviométrica y la pobreza edáfica representan un factor limitante de primer orden. En una sociedad como la tradicional, donde la agricultura es la base económica, suelo y agua adquieren particular relevancia. Por ello, cuando el entorno no ofrece, en la medida suficiente, esos elementos, intentar mantener uno y acrecentar el otro, es la máxima que ha guiado las actuaciones humanas en las tierras semiáridas. Estas se sintetizaban en una doble aptitud: de una parte, buscar los medios para aprovechar las lluvias, generalmente concentradas en unos cuantos acontecimientos estacionales y, de otra, controlar su capacidad erosiva sobre los suelos y adoptar las medidas necesarias para reducir los coeficientes de escorrentía (Morales y Hernández, 2018).

Los agricultores (dado que estas prácticas se enmarcan en sociedades tradicionales con predominio de base agraria), para minimizar los rasgos citados, idearon una sistematización del territorio que consistía en la recolección de aguas de avenida (es decir, las circulantes por ramblas y barrancos coincidiendo con precipitaciones de una cierta intensidad) mediante la instalación de infraestructuras en los lechos de las ramblas para, posteriormente, ser canalizada hasta los campos de cultivo (en lo que se denomina inundación dirigida), o bien para almacenarse en cisternas para uso doméstico (Morales, 1969; Morote, 2013). Los beneficios, entendidos en términos de externalidades positivas que conllevaba su utilización, son en palabras de Moltó y Hernández (2012) los siguientes: a) Se recargaban los acuíferos al laminarse grandes extensiones de terreno; b) Se reducía la erosión y se facilitaba la retención de sedimentos, ya que todo el espacio roturado estaba estructurado mediante un complejo sistema de abancalamientos que impedían el arrastre y pérdida de suelo en estas áreas (Marco y Morales, 1995); y c) Se minimizaba el riesgo de inundación, pues gran parte del caudal circulante de las ramblas y vertientes se distribuía entre los cultivos con lo que se aminoraban los efectos destructivos de las avenidas fluviales en los tramos bajos.

En España, el abandono de los sistemas de aprovechamientos de turbias se produjo a lo largo del s. XX, llegándose a practicar residualmente en pequeñas áreas hasta 1960 (Morote y Hernández, 2017). Hernández et al. (2016) asocian esta desarticulación a cambios en las dinámicas socio-económicas y al incremento de la disponibilidad y calidad de recursos hídricos. En el primero de los casos hay que mencionar, por un lado, la progresiva industrialización y terciarización de la sociedad y, por otro, la baja rentabilidad de los cultivos de secano que no pudieron resistir la competencia salarial surgida en el área litoral, donde se instalan actividades secundarias y terciarias, así como áreas de cultivo de regadío de elevada cotización en los mercados. A la progresiva pérdida de trascendencia de las actividades agrarias hay que unir la urbanización del espacio rural, especialmente coincidiendo con el último boom inmobiliario (1997-2007) (Burriel, 2008). El segundo de los factores se relaciona con la posibilidad de disponer de mayores volúmenes de agua y de mayor calidad gracias a las mejoras tecnológicas que garantizan el abastecimiento, lo que determina el abandono de estas estas prácticas antiguas.

Con el abandono de los aprovechamientos de aguas pluviales, los beneficios han desaparecido y se han acentuado determinados riesgos que esta ordenación mitigaba, a saber: los espacios vuelven a su estado natural o casinatural, los bancales se erosionan, las laderas se desestabilizan, se incrementa la escorrentía, etc. También puede ocurrir que el sistema de boqueras entre en funcionamiento, provocando inundaciones en las áreas que antiguamente eran espacios agrícolas y que en la actualidad se han convertido en urbanizaciones. Un ejemplo de ello es el gran número de antiguas boqueras que han sido sustituidas por caminos en el término municipal de San Vicente del Raspeig (Alicante), insertos, a su vez, en áreas urbanizadas, lo que acentúa el riesgo de inundación (Morote, 2013). Las consecuencias de esta situación no sólo están presentes donde estos fenómenos se han desencadenado, sino también en las partes más bajas de las cuencas vertientes si se tiene en cuenta que es precisamente en este sector de la cuenca donde la ocupación humana, tanto núcleos de población como infraestructuras, alcanza mayor densidad (Hernández y Moltó, 2010). Un ejemplo de ello es la zona que se encuentra al sur del núcleo urbano de San Vicente del Raspeig conocida como el Plà de la Cova y donde en la actualidad se ubica la Universidad de Alicante. Esta área es una zona endorreica, que tradicionalmente se irrigaba mediante la práctica de las boqueras. En el episodio de precipitaciones de fuerte intensidad horaria del 30 de septiembre de 1997 se anegaron sótanos de edificios y viales al acumularse el caudal desbordado de la Rambla del Rambuchar y la escorrentía que descendía del núcleo urbano de San Vicente (Morote y Pérez, 2019).

Los enfoques de análisis del riesgo de inundación en España han evolucionado desde los análisis meramente descriptivos de episodios extremos ocurridos, hacia trabajos complejos que han ido desarrollando paulatinamente los conceptos de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo. En los primeros primaba la explicación causal del componente de la peligrosidad (causas atmosféricas y comportamiento hidrológico de las crecidas), y se describían los efectos producidos en el ámbito afectado (Olcina, 1994). Progresivamente, estos enfoques han dado paso a los estudios de riesgo en sentido estricto, donde la peligrosidad es un elemento más entre los componentes que integran un proceso de riesgo (Calvo, 2001). Vulnerabilidad y exposición al riesgo han cobrado relevancia debido al componente humano que encierran los eventos naturales extremos en sus causas y sus efectos (Del Moral y Giansante, 2000; Olcina, 2008; Vargas y Paneque, 2017). Por su parte, los trabajos sobre medidas y políticas de reducción del riesgo han experimentado también una evolución desde los enfoques que han primado la necesidad de medidas estructurales como solución preferente para evitar efectos de futuras inundaciones, hacia aproximaciones que destacan el papel de las actuaciones "no estructurales", y abordan la planificación territorial, la educación y comunicación para el riesgo o los planteamientos de tratamiento "natural" de los cauces (Ollero, 2015) como acciones de mayor eficacia y sostenibilidad territorial ante el peligro de inundaciones (Olcina et al., 2016).

El cuestionamiento al que se han visto sometidas las obras hidráulicas como forma de gestión dominante frente al riesgo de inundación ha provocado la aparición de un cambio de paradigma que apuesta por alternativas de gestión dirigidas a "convivir con el riesgo" (Laaser et al., 2009). Una nueva visión que recoge la Directiva Europea de Inundaciones (Directiva 2007/60/CE) y que pretende devolver al sistema fluvial, en la medida de lo posible, al menos una parte del espacio usurpado. A este espacio se le denomina con diferentes expresiones, como room for rivers, espace de liberté fluviale, free space for rivers, streamway o river widening (Sayers et al., 2013). Paralelamente a este paradigma, en ámbitos administrativos europeos se están fomentando medidas de retención natural del agua (Natural Water Retention Measures, en inglés) (European Commission, 2014) en el marco de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS, Natured Based Solutions) (European Commission, 2015; Raymond et al., 2017).

El tránsito en el enfoque de estudio de las áreas con posibilidad de padecer el peligro de inundaciones a los "territorios de riesgo" ha supuesto una adaptación rápida de los análisis sobre inundaciones a la nueva realidad geográfica del mundo globalizado que viene determinada por los cambios acelerados en el espacio geográfico que afectan a todos sus elementos integrantes (naturales, sociales, económicos,

infraestructurales y patrimoniales.

El uso de las aguas pluviales en las sociedades actuales presenta un notable interés teniendo en cuenta las previsiones de cambio climático (Saunder y Peirson, 2013) que para el Mediterráneo Occidental señalan una acentuación de los fenómenos extremos, es decir aumento de los periodos de sequía y de las precipitaciones de fuerte intensidad horaria. En ambos casos la gestión de las pluviales resulta prioritaria para minimizar impactos sobre los recursos hídricos (aumento de la presión sobre el agua potable) y el entorno (inundaciones). Los objetivos de esta publicación son: a) examinar el cambio de paradigma en la consideración de las aguas pluviales; b) analizar experiencias de aprovechamiento de las aguas pluviales; c) examinar la gestión de las aguas pluviales en las ciudades mediterráneas de Barcelona y Alicante; y d) reflexionar sobre el significado y potencialidad del uso de pluviales como una técnica tradicional en ámbitos semiáridos y como estas técnicas se insertan en nuevos paradigmas. La hipótesis de partida de esta investigación es que el uso de las aguas pluviales, de honda tradición en ámbitos semiáridos, puede considerarse como un recurso frente a su tradicional consideración como un riesgo. Su uso puedo contribuir a minimizar, entre otros, el riesgo de inundación.

2. EL USO ACTUAL DE LAS AGUAS PLUVIALES: DE RIESGO A RECURSO

En las sociedades tradicionales de los ámbitos semiáridos el aprovechamiento de las escorrentías y la laminación de agua de los cauces facilitaban un control de la torrencialidad y de los procesos de erosión hídrica. De manera que, ahora, cuando se producen episodios de lluvia de fuerte intensidad horaria, la arroyada superficial se ve acelerada, provocando un aumento considerable de los caudales circulantes y potenciando la capacidad erosiva (Morales, 1986) y los efectos de las inundaciones. Paralelamente, muchas áreas urbanas sufren escasez de agua, aunque, paradójicamente, una fuente local de agua, como el agua de lluvia, se trata principalmente como un riesgo y no como un recurso valioso que puede reducir la presión sobre el agua potable (Gires y De Gouvello, 2009; Sedlak, 2014; Hernández y Morote, 2019).

El aumento de las áreas urbanizadas ha tenido notables impactos en el ciclo hidrológico urbano (Vallès et al., 2016). La incapacidad manifestada por los sistemas de alcantarillado convencionales de hacer frente a nuevos desarrollos urbanos, así como a los caudales circulantes en situaciones de fuerte intensidad horaria y a los efectos que la impermeabilización está teniendo en el ciclo hidrológico urbano ha dado lugar desde los años noventa a propuestas de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), diseño urbano sensible al agua (WSUD), desarrollo de bajo impacto (LID) o infraestructuras verdes que abogan por el manejo de la escorrentía lo más cerca posible de su origen y la adopción de estrategias más respetuosas con el medio y con el ciclo del agua (Morison y Brown, 2011; Rodríguez, et al., 2014). El interés por estas prácticas innovadoras de gestión del agua de lluvia supone una ruptura con los enfoques convencionales de "fin de tubería" (basados en el transporte de agua fuera del sitio a instalaciones de detención centralizadas) (Nóblega et al., 2020).

Tradicionalmente, la escorrentía urbana causada por episodios de precipitación de fuerte intensidad horaria ha sido considerada como un riesgo en términos de cantidad (inundaciones urbanas) y de calidad (contaminación) (Sales-Ortells y Medema, 2015). Por tanto, y al igual que las aguas residuales, el objetivo de los planificadores y gestores hídricos era deshacerse cuanto antes de estos flujos mediante los sistemas de alcantarillado y transporte hasta fuera de las áreas urbanas. Actualmente, y aunque esta opción sigue siendo hegemónica, muchas opiniones desde ámbitos políticos, técnicos y ciudadanos se manifiestan por un cambio de paradigma que explore la dimensión de recurso potencial que albergan estos flujos hasta ahora no deseados. Según Cousins (2017), este cambio de paradigma tiene que ver con las modificaciones en la gobernanza del ciclo hidrológico urbano, con la emergencia de nuevos actores profesionales y sociales en un ámbito tradicionalmente reservado a los ingenieros y, también, con la ampliación del abanico de opciones de adaptación al cambio climático. Para autores como Brown et al. (2009) el cambio de riesgo a recurso constituiría una etapa fundamental en la transición hacia

ciudades "hidrosensibles" (Water Sensitive Cities, en inglés). En espacios urbanos, ello se concretaría en una planificación y gestión de los recursos hídricos basada en la provisión de los múltiples servicios que pueden ofrecer los flujos hídricos, no solamente en términos de suministro de agua y protección frente a inundaciones y protección de la salud pública, sino también en términos de actividades de recreo y ocio, conservación de ecosistemas e incremento de la biodiversidad urbana, neutralidad climática y sostenibilidad a largo plazo (Morote, 2017).

Según Sitzenfrei et al (2013) para enfrentar los próximos desafíos como el cambio climático, el rápido crecimiento de las ciudades y la escasez de agua, la infraestructura hídrica debe ser más flexible, adaptable y sostenible. El enfoque en el cambio de paradigma es una concepción circular y no lineal de los flujos hídricos en las ciudades de manera que puedan ser objeto de múltiples usos. Por ejemplo, los denominados Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se basan en imitar ciertos procesos naturales del ciclo hidrológico como, por ejemplo, la retención de caudales y su posterior infiltración en el subsuelo para pasar a ampliar la disponibilidad de aguas subterráneas. Con ello se consigue detraer escorrentía capaz de generar inundaciones al tiempo que se ganan flujos para una posible utilización posterior. Este enfoque alimenta, por otra parte, nuevas estrategias de verde urbano orientadas a facilitar servicios ecosistémicos muy relevantes como, por ejemplo, la adaptación a episodios de temperaturas extremas (Martín-Vide y Moreno-García, 2020) y que también pueden restar flujos de avenidas urbanas mediante procesos como la evapotranspiración.

Estos sistemas tendrían como finalidad, por tanto, la recogida de las aguas, su trasporte y almacenamiento el máximo tiempo posible con objeto de ralentizar su velocidad y favorecer su infiltración y, consiguientemente, la recarga de acuíferos y la laminación de las crecidas. Se puede afirmar, por tanto, que intentan recuperar, en la medida de lo posible, el ciclo hidrológico natural perdido por años de impactos humanos (Rodríguez, 2005) y minimizar impactos negativos (Jato-Espino et al., 2016; Wella-Hewage et al, 2016). Con la captación de caudales antes de su entrada en los sistemas unitarios de alcantarillado se trataría de evitar su colapso, así como de las plantas de tratamiento y, a su vez, evitar que los vertidos contaminantes acaben degradando las masas de agua (Prokop et al., 2011).

A este planteamiento, se une, su recolección (rainwater harvesting, en inglés) y posterior utilización como recursos no convencionales basándose en el principio de adecuación de la calidad de las aguas según su uso (fit for purpose) (Hernández et al., 2016). El uso del agua de lluvia como recurso hídrico alternativo podría configurarse, asimismo, como un paso importante hacia una sociedad más democrática si los recursos ambientales fueran controlados por la ciudadanía y utilizados de manera racional, sostenible y renovable.

3. EXPERIENCIAS DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS PLUVIALES. PRESENTE Y FUTURO

3.1. A escala global

Actualmente, las aguas pluviales están siendo reconocidas como un recurso alternativo de creciente importancia. Desde finales de la década de 1990, la adopción de sistemas de drenaje urbano sostenible y el almacenamiento de pluviales ha ido en aumento. Países como EE.UU., Reino Unido, Francia, Suecia o Australia están utilizando los SUDS desde hace más de un decenio mejorando con ello la calidad ambiental de sus ciudades (Construction Industry Research and Information Association [CIRIA], 2000). En el ámbito internacional, existe un gran número de experiencias y publicaciones en torno al uso de aguas pluviales para usos urbanos atendiendo a esa doble finalidad mencionada (De Gouvello y Deutsch, 2000).

Desde la óptica de los sistemas sostenibles de drenaje urbano, por un lado, cabe mencionar aquellos que analizan la captación de aguas pluviales para reducir la escorrentía superficial y minimizar el riesgo

de inundación y, generalmente, bajo la óptica del cambio climático, es decir, con premisas futuras de acentuación de episodios extremos de precipitaciones de fuerte intensidad horaria (Notaro et al., 2013). Y por otro, los que contemplan la captación de aguas pluviales con la finalidad de almacenar las escorrentías que llevan gran carga de contaminantes y evitar así la degradación de ríos y ecosistemas marinos (Sales-Ortells y Medema, 2015). Desde el punto de vista de un posterior aprovechamiento, cabe señalar, por un lado, los estudios que tratan estrictamente de los sistemas de captación y almacenamiento de las pluviales mediante la utilización de tanques o depósitos (*rainwater tanks* en inglés) (Delaney y Fam, 2015) y, por otro, aquellos que analizan el posible destino de estos recursos para suplir determinados usos consuntivos urbanos). Esta puede ser una solución alternativa eficaz de abastecimiento de agua en regiones sometidas a estrés hídrico, bien por condiciones climáticas (aridez) o por el desarrollo de usos y actividades que conllevan significativos incrementos de la demanda.

El interés por este tipo de actuaciones se ha visto acentuado por las previsiones de cambio climático, donde los efectos previstos del calentamiento térmico planetario se manifestarán, según los modelos predictivos, en una disminución del volumen de precipitaciones y un incremento en su variabilidad temporal y espacial (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018; Agencia Estatal de Meteorología [AEMET], 2019), pero también, al ser incluidos en la estrategia de adaptación al cambio climático.

En este sentido, en 2013, la Unión Europea aprobó la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático que persigue convertir a los países europeos en territorios más resilientes ante las modificaciones previstas en las condiciones climáticas. La plataforma Climate-Adapt en Europa reúne, en este contexto, la información sobre los proyectos europeos de adaptación al cambio climático desarrollados o en fase de desarrollo en diferentes países (Schmidth-Thomé, 2005). Entre las diversas actuaciones se contemplan la combinación de medidas estructurales y medidas blandas para la protección frente a inundaciones o proyectos de mejora de la gestión del agua en zonas con recursos limitados (por ejemplo, Malta o España) (Morote et al., 2019). En otras regiones, la adopción de iniciativas de drenaje urbano sostenible tiene como objetivo aumentar la resistencia de los territorios al cambio climático y fomentar la economía circular. A este respecto, es significativo el programa de medidas de retención de agua natural patrocinado por la *European Commission* (2014) denominado *Natural Water Retention Measures*. Entre las acciones implementadas se encuentran la construcción de tanques y colectores de agua de lluvia y el desarrollo de áreas de inundación natural, por ejemplo, en Rotterdam (City of Rotterdam, 2013), Copenhague (City of Copenhagen, 2011) o Berlín (Pérez de las Heras, 2015).

Un ejemplo a nivel mundial de adaptación a los riesgos presentes y futuros que proceden de manifestaciones extremas del agua es el programa de adaptación a los riesgos naturales y el cambio climático de la ciudad de Rotterdam. Este reviste un enorme interés por la concepción integral del fenómeno (subida nivel del mar, intrusión marina, incremento de eventos de inundación, incremento de la isla de calor urbana y disconfort climático) y de la respuesta (medida estructural y de planificación territorial). La "Estrategia de Adaptación al Cambio Climático" (City of Rotterdam, 2013) es un documento de planificación territorial y rediseño urbano con el objetivo de: a) la adaptación a la subida de temperaturas mediante la creación de jardines colectivos dentro de las manzanas edificadas, tejados verdes o empleo de vegetación para cubrir los diques); b) la subida del nivel de mar a través del recrecimiento de diques existentes y nuevos diques o la elevación de cota de edificación; c) el aumento de la resiliencia ante el incremento de inundaciones mediante la construcción de depósitos pluviales, colectores de agua pluvial o de espacios de inundación natural en la ciudad.

El creciente interés en este tipo de infraestructura se refleja en numerosas iniciativas destinadas a fomentar la infraestructura verde a escala mundial (Suleiman et al., 2020). En Holanda, en las ciudades se están construyendo instalaciones de almacenamiento de aguas pluviales para evitar inundaciones que combinan con funciones como la recreación o la reducción de los efectos contaminantes de las aguas.

En Chile se están llevando a cabo actuaciones en llanuras de inundación como el *Zanjón de la Aguada* (Santiago de Chile) con la construcción de parques inundables (Ministerio de Obras Públicas, 2001) o diversas actuaciones insertas en el programa *Sponge City* ("ciudad esponja") iniciado en 2015 en numerosas ciudades chinas (entre otras Shanghai, Wuhan y Xiamen) (Shun Chan et al., 2018).

En España comienzan a desarrollarse estrategias de adaptación al cambio climático y a los extremos atmosféricos asociados, que contemplan medidas estructurales (obras de adaptación, acciones relacionadas con la energía y con el abastecimiento de agua) y no estructurales (ordenación del territorio). Las actuaciones se relacionan con el desarrollo de sistemas de captación de agua pluvial para reducir la peligrosidad del agua circulante en el callejero (depósitos pluviales), mejoras en el alcantarillado urbano para adaptarlo a intensidades de caudal mayores (SUDS) o la construcción de espacios de almacenamiento de agua pluvial bajo la forma de áreas de recreo (parques inundables). Destacan, en este contexto, Barcelona, Málaga, Alicante, Reus, Calviá y diversos municipios del País Vasco (Morote y Hernández, 2017).

3.2. La ciudad de Barcelona

Históricamente, el drenaje urbano en Barcelona ha seguido el mismo modelo que el de muchas ciudades europeas. Es decir, construyendo, ampliando y consolidando una red de alcantarillado que empezó a gran escala con el denominado Plan García Faria en 1907, pensado básicamente para el Ensanche de Cerdà, y terminó en la década de 1990 con la instalación de los grandes colectores que habrían de posibilitar la recuperación del frente marítimo del Poble Nou, en una operación vinculada a los Juegos Olímpicos de 1992. Todo ello se acompañó con la construcción o ampliación de dos grandes Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) situadas respectivamente en las desembocaduras de los ríos Besòs y Llobregat y su conexión con los grandes colectores de la red de alcantarillado desarrollada a lo largo de la década de 1990. Sin embargo, hacia mediados de esta década las inundaciones continuaban afectando partes importantes de la ciudad. Así, el Plan Especial de Alcantarillado de 1997 tenía como elemento más distintivo la construcción de grandes depósitos de recogida de agua de lluvia en espacios de la ciudad caracterizados por su inundabilidad crónica. Estos depósitos se diseñaron con el objetivo de reducir y liberar de una manera controlada los flujos de inundación para aliviar las frecuentes sobrecargas de las depuradoras después de un episodio de lluvia torrencial. En 2015 se habían construido un total de 12 depósitos de estas características con una capacidad total de almacenamiento de alrededor de medio millón de metros cúbicos. En general, el funcionamiento de estos depósitos ha sido satisfactorio, aunque las inundaciones siguen suponiendo un problema para ciertos barrios de la ciudad como El Raval, en Ciutat Vella, repetidamente inundado (hasta tres episodios en 2017-2018) durante los últimos años (Macedo, 2018).

La construcción de los grandes depósitos para contener el agua de avenida abrió, por otra parte, la posibilidad de reciclar y reutilizar estos flujos para aumentar los recursos hídricos locales y con la opción de destinarlos a usos no potables. Sin embargo y hasta el momento, estos flujos, que combinan aguas pluviales y aguas residuales se encuentran altamente contaminados por lo que deben tratados en las EDAR de la ciudad y, posteriormente, liberados al mar. No existe, por tanto, una reutilización significativa puesto que para usos no potables se ha preferido el agua subterránea del llano de Barcelona muy recuperada en términos de calidad tras décadas de contaminación extrema.

En 2006 se aprobó un nuevo Plan Integral de Alcantarillado para la ciudad que seguía insistiendo en la necesidad de ampliar el número de depósitos subterráneos para contener aguas de tormenta dentro de una concepción del drenaje urbano todavía convencional. Sin embargo, el mismo plan incluía unas denominadas "técnicas para drenaje urbano sostenible" que, durante episodios de lluvias torrenciales e inundaciones debían ejercer una función de control de los flujos de avenida en la etapa previa a la entrada de estos últimos en la red de alcantarillado. En este plan, se hacía hincapié en el carácter experimental de estas medidas, pero se adoptaba ya el término de Sistemas Sostenibles de Drenaje

Urbano (SUDS) para referirse a sistemas que gestionarían la escorrentía urbana bajo los principios de confinamiento; reducción de superficies impermeables y facilitación de la infiltración, así como, eventualmente y en una fase posterior, de reutilización de estos flujos. Sin embargo, el plan no fijó ninguna propuesta presupuestaria para el desarrollo de estos sistemas ni tampoco contempló la posibilidad de reemplazar parte del alcantarillado convencional con SUDS (Saurí y Palau-Rof, 2017).

Hasta la fecha se han llevado a cabo distintos proyectos de implantación de SUDS en la ciudad vinculados a nuevos sectores residenciales o a operación de renovación urbana de barrios degradados, así como a áreas de ocio como parques urbanos. Estos proyectos presentan algunas novedades interesantes en materia de gestión de inundaciones y del ciclo urbano del agua en general. En primer lugar, sus promotores no son ingenieros, tradicionalmente a cargo del diseño, construcción, operación y mantenimiento del drenaje urbano, sino arquitectos paisajistas interesados en ambientalizar las operaciones urbanísticas (Suleiman et al., 2019). Un segundo aspecto novedoso es que, en algunos casos, como los SUDS integrados en el proyecto de rehabilitación de barrio del Bon Pastor, en el este de la ciudad, se ha consultado a los vecinos sobre el diseño y funcionalidades de los sistemas (Nóblega et al., 2020). En tercer lugar, la redacción de un manual de buenas prácticas sobre el diseño y puesta en práctica de estos sistemas permite pensar en que puedan estar superando la fase de "proyectos piloto" y pasen a constituir alternativas realistas a la gestión del drenaje urbano en la ciudad. Por otra parte, sin embargo, su desarrollo en una ciudad tan densa como Barcelona (ciudad con 1.636.762 hab.) (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2019) puede ser limitado y se cuestiona su funcionamiento en eventos de precipitación de gran intensidad horaria que pueden superar rápidamente la capacidad de absorción de estos sistemas y, por tanto, multiplicar los impactos de las inundaciones.

3.3. La ciudad de Alicante

En la ciudad de Alicante, de 334.887 hab. (INE, 2019), la empresa encargada del suministro de agua potable (Aguas Municipalizadas de Alicante, Empresa Mixta, AMAEM), como consecuencia del incremento de los volúmenes de agua asociado a la difusión de tipologías urbanas donde predominan los usos exteriores, las nuevas propuestas sobre gestión de recursos hídricos que abogan por el uso diferenciado de calidades de agua según usos y la necesidad de minimizar los impactos asociados a precipitaciones de cierta intensidad ha apostado en los últimos años por la adopción de nuevas actuaciones conducentes a la incorporación de recursos hídricos tradicionalmente descartados como son las pluviales. La recogida y posterior uso del agua de escorrentía de la lluvia no sólo puede permitir aumentar la oferta del recurso (una vez depuradas), sino también presentar una triple finalidad ambiental:

- Minimizar el riesgo de inundación de determinados espacios de riesgo reiterado y donde actuaciones de corte estructural no han logrado solventar este problema.
- Reducir el nivel de contaminación del drenaje urbano superficial dado el elevado porcentaje de plomo debido a la polución de los vehículos y resto de residuos que contienen estas aguas. Con esta medida, se mitigan los daños generados por estos vertidos en las playas con la consiguiente pérdida de calidad de sus aguas. Estos dos últimos factores cobran una gran importancia, teniendo en cuenta la relevancia de la actividad turística de sol y playa que se desarrolla en la ciudad.
- Se aumenta la superficie ajardinada de la ciudad al destinar estos caudales para el riego de estos espacios, reduciendo la presión sobre las aguas blancas.

En la ciudad de Alicante, hasta el momento, las actuaciones llevadas a cabo por AMAEM en materia de almacenamiento de pluviales han sido dos: el Tanque Anticontaminación Ingeniero José Manuel Obrero Díez, cuyo objetivo primigenio es el de reducir la contaminación de las primeras escorrentías que circulan por las áreas permeables de la ciudad y, evitar, de este modo, su vertido al mar; y el Parque Inundable La Marjal, construido con la finalidad de resolver los problemas de inundación en

el sector urbano denominado “Alicante Golf”.

El origen de la primera de estas infraestructuras se remonta al año 2006. En el Marco del Plan Especial de Inversiones, AMAEM aprobó la construcción de este depósito de 14 metros de profundidad (Figura 1), localizado en el sur de la ciudad (barrio de San Gabriel) y cuyo presupuesto ascendió a 15,7 millones de euros. Dicho depósito se sitúa en el subsuelo de las instalaciones del Polideportivo Juan Antonio Samaranch y cuenta con un volumen máximo de almacenamiento de 60.000 m^3.

Con su construcción, se pretende reducir el número y volumen de vertidos contaminantes al mar a través de los aliviaderos situados en la desembocadura del Barranco de las Ovejas y mejorar significativamente los problemas de desbordamientos y anegamiento que la zona centro y sur de la ciudad registra en periodos de lluvias intensas, evitando el colapso de las redes de alcantarillado. Su diseño permite el llenado por gravedad desde la conexión con los colectores unitarios adyacentes y una vez almacenada el agua, se impulsa a la depuradora de Rincón de León (a un kilómetro de distancia) mediante una estación de bombeo situada en el Parque Joan Fuster. De esta manera, las aguas pluviales captadas, se depuran y se pueden insertar en el ciclo hidro-social de la ciudad como aguas depuradas regeneradas o bien ser vertidas al mar.



Figura 1. Vista interior del Tanque Anticontaminación Ingeniero José Manuel Obrero Díez.
Fuente: autores.

Este depósito, que recoge las primeras escorrentías de aproximadamente el 50% de la superficie permeable de la ciudad de Alicante, prácticamente se puede llenar en apenas 30 minutos con una precipitación de 30 litros/hora, reduciendo, en parte, los caudales que se acumulan en los sectores próximos a la línea de costa de los Barrios de San Gabriel o Polígono de Babel, donde desembocan, a su vez, el barranco de San Gabriel y el de San Blas. Un breve análisis de los volúmenes almacenados (Figura 2) pone de manifiesto que ha entrado en diversas ocasiones desde su finalización en mayo de 2011. 2019 fue el año que ha registrado el máximo volumen almacenado hasta la actualidad (585.534 m^3) Por otra parte, la aminoración de volúmenes coincide con la sequía de 2014 y 2015.

Un breve análisis de la distribución mensual de los volúmenes almacenados (Tabla 1) evidencia su concentración principalmente en los meses otoñales y, en menor medida, primaverales, poniendo de manifiesto el ritmo pluviométrico característico del sureste peninsular). Ello se refleja en la existencia de picos muy destacados en determinados meses y años como, por ejemplo, abril de 2013 (148.060 m^3), diciembre de 2016 (170.432 m^3) o agosto y septiembre de 2019 (con 111.200 y 126.7374 m^3, respectivamente). A modo de ejemplo, se puede mencionar las tormentas del 19 y 20 de octubre de 2016, con una entrada total de 58.416 m^3, de los cuales 31.434 se acumularon tras la tormenta del día

20 cuando en poco más de media hora se recogieron 21,2 l/m^2. Todo ello se refleja en el volumen acumulado en el tanque antitormenta donde es frecuente que un único mes concentre más del 20% del volumen acumulado anualmente frente a aquellos donde el volumen acumulado es cero.

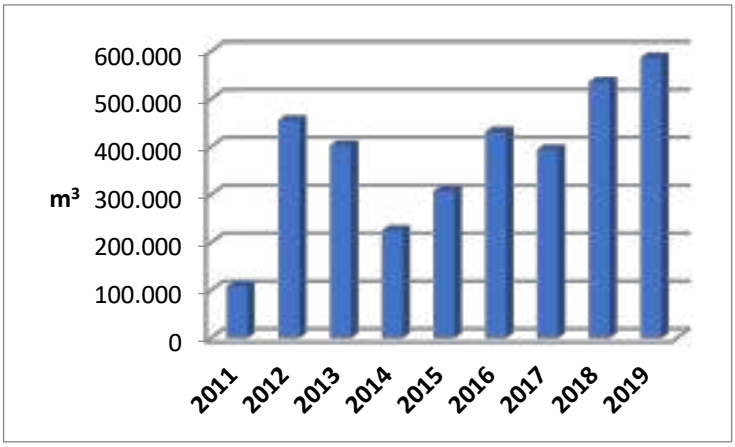


Figura 2. Evolución del agua almacenada (m^3) en el Tanque Anticontaminación Ingeniero José Manuel Obrero Díez (2011-2019). Fuente: AMAEM. Elaboración propia.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	s.d.								
Febrero	s.d.								
Marzo	s.d.								
Abril	s.d.								
Mayo									
Junio									
Julio									
Agosto									
Septiembre									
Octubre									
Noviembre									
Diciembre									
Leyenda		Sin lluvia recogida			60.001-90.000 m^3				
		< 30.000 m^3			90.001-120.000 m^3				
		30.001-60.000 m^3			>120.001 m^3				

s.d. Sin funcionamiento. Se inauguró en mayo de 2011.

Tabla 1. Volumen almacenado mensualmente en el Tanque Anticontaminación (2011-2019). Fuente: AMAEM. Elaboración propia.

En la ciudad de Alicante, la segunda obra de almacenamiento de pluviales es el Parque Inundable La Marjal, situado en la Playa de San Juan (noreste de la ciudad) y finalizado en 2015. La actuación presupuestada en 3,6 millones de euros, que consistió en la ejecución de un parque público con áreas verdes, zona de paseo, juegos para niños, etc., que asemeja a una zona endorreica (Figura 3) se completa con su carácter de mitigación del riesgo de inundación. Este parque actúa como depósito

(capacidad total de 45.000 m^3 y una cota de inundación de 5,60 metros) para almacenar temporalmente los caudales que se concentran en este sector. Su objetivo principal, por tanto, es dar solución al anegamiento de este espacio que corresponde a una antigua zona de marjal (de ahí su nombre) que, desde la década de los años sesenta ha sido objeto de una progresiva ocupación por usos urbano-residenciales. Su construcción, junto a dos grandes colectores en las Avenidas Conrado Albadalejo y Pintor Pérez Gil, trata de resolver los problemas de inundación recurrentes en la parte baja de la Avenida Pintor Pérez Gil (urbanización "Alicante Golf"-Hoyo 1) (Olcina, 2004).



Figura 3. Parque Inundable la Marjal. Fuente: autores.

El llenado del estanque, coincidiendo con precipitaciones de una cierta intensidad horaria, se produce lentamente para minimizar cualquier potencial riesgo sobre el espacio lúdico, pero, también para laminar los efectos de acumulación de agua en los sectores urbanizados próximos. Una vez almacenada el agua, se puede vaciar a través de la red existente en la calle Oviedo mediante válvulas motorizadas o bien, si la calidad del agua almacenada en el parque lo aconsejan, existe la posibilidad, gracias a una estación de bombeo, de enviar estas aguas a la depuradora de Monte Orgegia (a unos 4 km) para su posterior reutilización. Debido a su reciente construcción y al periodo de sequía iniciado en 2014, esta infraestructura ha funcionado en contadas ocasiones (Tabla 2). En este sentido, desde su inauguración en el mes de abril de 2015 y durante el resto de ese año únicamente se llegó a recoger y almacenar 3.500 m^3 (el 7,7% del total de su capacidad).

Los mayores volúmenes almacenados (15.000 y 22.000 m^3) se han registrado coincidiendo con el episodio del 13 de marzo de 2017 (150 litros entre las 19,30 y las 22,00 horas) y tras las tormentas del 20 de agosto de 2019 cuando según AEMET acumuló 86,8 litros por metro cuadrado, 41,2 de ellos en tan solo una hora. Estos volúmenes contrastan notablemente con el resto de los volúmenes almacenados que son inferiores a los 3.000 m^3 (Figura 4).

	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	s.d.				
Febrero	s.d.				
Marzo	s.d.				
Abril					
Mayo					
Junio					
Julio					
Agosto					
Septiembre					
Octubre					
Noviembre					
Diciembre					
Total	**3.500**	**4.500**	**18.100**	**2.100**	**24.000**
Leyenda		Sin lluvia recogida		1.001-5.000 m^3	
		< 1.000 m^3		> 5001-20.000 m^3	

s.d. Sin funcionamiento. Se inauguró en abril de 2015.
Tabla 2. Volumen almacenado mensualmente en el Tanque Anticontaminación (2011-2019). Fuente: AMAEM. Elaboración propia.



Figura 4. Inundación del Parque la Marjal tras los episodios de lluvias del 20 y 21 de agosto de 2019. Fuente: https://www.diarioinformacion.com/alicante/2019/08/21/directo--interior-provincia-alicante/2179106.html

4. REFLEXIONES SOBRE EL FUTURO DE LAS AGUAS PLUVIALES: LUCES Y SOMBRAS

El uso de aguas pluviales constituye una alternativa de extraordinario interés para paliar la escasez natural de recursos hídricos e incrementar la resiliencia de estos territorios ante los posibles efectos que se manifestarán con el cambio climático en áreas mediterráneas. A este factor, habría que incorporar otras ventajas entre las que cabría hacer mención: a su carácter de recurso renovable; su obtención a escala local (lo que elimina las tensiones entre territorios por su uso); su acceso (al menos a priori, gratuito); y una disponibilidad relativamente fácil, siempre que se adopten a escala doméstica y vinculados a estrategias de "cosecha de agua" y drenaje urbano sostenible (Vargas et al., 2014).

Esta última cuestión evidencia la importancia de incluir una dimensión social y política especialmente en lo que se refiere a las condiciones de gobernanza del agua de las aguas pluviales. En este sentido, el denominado enfoque de la Ecología Política Urbana se ha erigido como un referente teórico de gran interés para examinar los procesos socio-ecológicos que suceden en el interior de las áreas urbanas y turísticas y, particularmente, los marcos de poder bajo los que se metabolizan recursos como el agua (Hernández et al., 2016). Así, flujos urbanos antes desconocidos, ignorados o tratados como peligrosos pueden pasar a adquirir nuevas funciones como bienes que pueden atraer el interés de ciertos actores como, por ejemplo, las compañías proveedoras de agua (como ha sucedido en Alicante) o grandes usuarios como las corporaciones locales o los particulares. Trazar los flujos de pluviales a través del tejido urbano contribuye a conocer en toda su complejidad el funcionamiento de las ciudades inteligentes (las denominadas "*Smart Cities*") (March y Ribera, 2014) y su relación con los medios rurales y naturales más próximos.

La implementación de estas iniciativas en la escala local (Barcelona y Alicante) ha puesto de manifiesto una serie de beneficios y de potencialidades asociados a su uso como son:

- Una aminoración del riesgo de inundación mediante la laminación de las crecidas.
- Un incremento de la oferta de agua en la ciudad para usos no domésticos (riego de jardines y baldeo de calles).
- Una reducción de la contaminación y de los residuos que transportan las primeras escorrentías y, gracias a su acumulación, una aminoración de los vertidos al mar.
- Creación y mantenimiento de espacios verdes y lúdicos públicos gracias a una mayor disponibilidad de agua y el menor coste del recurso. Por ejemplo, en el caso de la ciudad de Alicante, el precio del agua regenerada se sitúa en 0,32 €/m^3 frente a los 1,69 €/m^3 del agua potable.
- Creación, en el caso de la ciudad de Alicante, de espacios de divulgación y de sensibilización de los riesgos de inundación a través de la realización de visitas, mayoritariamente, dirigidas a escolares (Parque Inundable La Marjal).

El interés despertado por este tipo de infraestructuras se evidencia en la elaboración de diversas propuestas de sistemas de drenaje urbano sostenible o infraestructura verde. En el caso de la provincia de Alicante cabe mencionar varios proyectos en diferentes fases de ejecución, a saber, antiguas áreas de turbias en San Juan, Elche y Benidorm. Estos tienen la intención de retener los flujos circulantes iniciales que coinciden con fuertes lluvias, reducir los procesos de inundación, evitar descargas contaminantes en el mar y crear nuevas áreas verdes. El proyecto de Benidorm ha sido seleccionado dentro de la iniciativa de Acciones Urbanas Innovadoras de la Unión Europea.

Como limitaciones al uso de este recurso y estos sistemas cabe mencionar, en primer lugar, la percepción de que en el sureste peninsular español no llueve a menudo. De ahí, la impresión de que este recurso tenga una escasa eficiencia o incluso se considere que la recogida de pluviales sea un recurso hídrico poco atractivo y mal valorado por la población local. En segundo lugar, el coste de su gestión. A pesar de que el agua de lluvia es gratis, esta contiene alta carga contaminante sobre todo si procede de drenaje urbano. En este sentido, cabe señalar el alto coste de su depuración y de la infraestructura de recolección y transporte en comparación con el beneficio económico que puede suponer utilizar el agua de lluvia a corto plazo. Ello determina que muchas empresas suministradoras de agua no lo consideren todavía como una actuación a corto plazo.

El reducido valor y conocimiento de estos sistemas contrasta con el gran valor que estas aguas, las denominadas aguas de turbias, tenían en estos territorios hasta mediados del pasado siglo. Las boqueras entendidas como ejemplo de sistemas de drenaje sostenible (utilizando terminología actual) constituyen un ejemplo de recuperación del conocimiento tradicional en la gestión del agua, que

aprovechaba el potencial del clima mediterráneo y convertía los riesgos en recursos, ya que aprovechaba al máximo las grandes cantidades de lluvia que caen en muy poco tiempo para aportar un caudal extra a las áreas cultivadas o las almacenaba para uso doméstico y, además, minimizaba sus efectos aguas abajo al laminar las crecidas. Estas finalidades conectan directamente con los postulados de las propuestas actuales de drenaje sostenible. A los argumentos de sostenibilidad ambiental esgrimidos para su implementación se uniría en estas tierras el de técnica endógena y asociada con esta sus valores etnográficos y patrimoniales.

REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2019). *Atlas Climático Ibérico*. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Ayuntamiento de Barcelona. Plan municipal de Adaptación al Cambio Climático. Ayuntamiento de Barcelona. Prepared-Enabling Change: http://www.prepared-fp7.eu/ y https://www.adaptationclearinghouse.org/resources/ec-prepared-enabling-change-project.html
- Brown, N., Keath, N. & Wong, T. (2009). Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science and Technology*, 59 (5), 847-855.
- Burriel, E. (2008). La década prodigiosa del urbanismo español (1997-2006). *Scripta Nova*, 270 (64). http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/383.htm
- Calvo, F. (2001). *Sociedades y territorios en riesgo*. Ediciones del Serbal, Barcelona.
- City of Copenhagen (2011). Copenhagen Climate Adaptation. https://international.kk.dk/sites/international.kk.dk/files/uploaded-files/Copenhagen%20Climate%20Adaptation%20Plan%20-%202011.pdf
- City of Rotterdam (2013). *Climate Change Adaptation Strategy*. Climate Proof. http://www.urbanisten.nl/wp/wp-content/uploads/UB_RAS_EN_lr.pdf
- Construction Industry Research and Information Association [CIRIA] (2000). *Sustainable urban drainage systems - design manual for Scotland and Northern Ireland* PUB *C521*. CIRIA, London.
- Cousins, J. J. (2018). Remaking stormwater as a resource: Technology, law, and citizenship. *WIREs Water*, 5, e1300. https://doi.org/10.1002/wat2.1300
- De Gouvello, B. and Deutsch, J.C. (2009). Rainwater harvesting and use in cities: Towards urban water management changes?. *Flux*, 76-77, 14-25.
- Del Moral, L. and Giansante, C. (2000). Constraints to Drought Contingency Planning in Spain: The Hydraulic Paradigm and the Case of Seville. *Journal of contingencies and crisis management*, 8 (2), 93-102.
- Delaney, C. and Fam, D. (2015). Technology in Society. The 'meaning' behind household rainwater use: An Australian case study. *Technology in Society*, 42, 179-186.
- Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32007L0060
- European Commission (2014). *Natural Water retention measures*. Technical Report - 2014 – 082, https://circabc.europa.eu/sd/a/2457165b-3f12-4935-819a-c40324d22ad3/Policy%20Document%20on%20Natural%20Water%20Retention%20Measures_Final.pdf
- European Commission (2015). Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities. Final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities'. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202
- Gires, A., and De Gouvello, B. (2009). Consequences to water suppliers of collecting rainwater on housing estates. *Water Science and Technology, 60* (3), 543-553. DOI: 10.2166/wst.2009.361
- Hernández, M. y Moltó, E. (2010). La cultura del agua en ámbitos semiáridos: valores

paisajísticos, ambientales y culturales. En: F. Leco Berrocal (eds.), *Territorio, paisaje y territorio rural*. XV Coloquio de Geografía Rural, 398-409. Universidad de Extremadura, Cáceres.

- Hernández, M. and Morote, A. (2019). The use of rainwater (Southeast Spain). A new urban approach to urban water management. *UPLanD. Journal of Urban Planning, Landscape & Environmental Design,* 4 (1), 53-66.
- Hernández, M., Saurí, D. y Moltó, E. (2016). Las aguas pluviales y de tormenta: del abandono de un recurso hídrico con finalidad agrícola a su implantación como recurso no convencional en ámbitos urbanos. En: J.F. Vera, J. Olcina y M. Hernández (eds.), *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la Geografía. Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil*, 1.099-1.120. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante.
- Instituto Nacional de Estadística [INE] (2019). *Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero*. https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2861#!tabs-tabla
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2018). *Special Report on Global Warming of 1.5ºC.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). https://www.ipcc.ch/sr15/
- Jato-Espino, D., Charlesworth, S.M., Bayon, J.R. and Warwick, F. (2016). Rainfall-runoff simulations to assess the potential of SUDS for mitigating flooding in highly urbanized catchments. *Int J Environ Res Public Health*, 13 (1), pii: E149. https://doi.org/10.3390/ijerph13010149
- Laaser, C., Leipprand, A., De Roo, C. and Vidaurre, R. (2009). *Report on good practice measures for climate change adaptation in river basin management plans*. European Environment Agency, Brussels.
- Macedo, G. (2018, octubre 9). El Paral·lel, desesperado con las inundaciones. *El Periódico.* https://www.elperiodico.com/es/tiempo/20181009/inundaciones-barcelona-paralelo-raval-7080043
- Marco, J. A. y Morales, A. (1995). Terrazas de cultivo abandonadas en el sureste peninsular: aspectos evolutivos. *Investigaciones Geográficas*, 13, 81-90.
- Martín-Vide, J. & Moreno-García, M. (2020). Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). Atmospheric Research, 240, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877
- Ministerio de Obras Públicas (2001). *Plan Maestro de Evacuación de Aguas Lluvias para Santiago.* Dirección de Obras Hidráulicas, Santiago de Chile.
- Moltó, E. y Hernández, M. (2012). La subexplotación de los paisajes culturales y su incidencia en los riesgos naturales. Una propuesta metodológica". En: E. Araque, R. Baena, C. Delgado et al. (Eds.), *Investigando en Rural*, 483-491. Asociación de Geógrafos Españoles, Sevilla.
- Morales, A. (1969). El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. *Papeles del Departamento de Geografía*, 1, 167-183.
- Morales, A. (1986). Abandono y desorganización de los sistemas de riegos de turbias. Su incidencia en la escorrentía". En: *Los paisajes del agua. Libro jubilar dedicado al profesor Antonio López Gómez,* 199-204. Universidad de Alicante y Universidad de Alicante, Valencia.
- Morales, A. y Hernández, M. (2018). Aproximación epistemológica sobre los usos de agua de avenida en las laderas subáridas. En: J.A.Marquez Domínguez, R. Mª Jordá. Borrel (coords), *Ciencia Regional y Andalucía a partir de la visión del geógrafo Gabriel Marco Cano García. Un homenaje a su vida y obra*, 279-288. Editorial Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Morison, P.J. and Brown, R.R. (2011). Understanding the nature of publics and local policy commitment to Water Sensitive Urban Design, *Landscape and Urban Planning*, 99 (2), 83-92. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.08.019
- Morote, A.F. (2013). El aprovechamiento de turbias en San Vicente del Raspeig (Alicante) como

ejemplo de sistema de riego tradicional y sostenible. *Investigaciones Geográficas*, 59, 147-169.
- Morote, A.F. (2017). El Parque Inundable La Marjal de Alicante (España) como propuesta didáctica para la interpretación de los espacios de riesgo de inundación. *Didáctica Geográfica*, 18, 211-230.
- Morote, A.F y M. Hernández (2017). El uso de aguas pluviales en la ciudad de Alicante. De Viejas ideas a nuevos enfoques. *Papeles de Geografía*, 63, 7-25.
- Morote, A.F., Olcina, J. and Hernández, M. (2019). The use of non-conventional water resources as a means of adaptation to drought and climate change in semi-arid regions: South-Eastern Spain, *Water* 11 (93). https://doi.org/10.3390/w11010093
- Morote Seguido, A.F. y Pérez Morales, A. (2019). La comprensión del riesgo de inundación a través del trabajo de campo: Una experiencia didáctica en San Vicente del Raspeig (Alicante). *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 19, 609-631.
- Nóblega, A., Saurí, D. and March, H. (2020). Community involvement in the implementation of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS): the case of Bon Pastor, Barcelona. *Sustainability*, 12, 510. https://doi.org/10.3390/su12020510
- Notaro, V., Fontanazza, C.M., Freni, G. and Puleo, V. (2013). Impact of rainfall data resolution in time and space on the urban flooding evaluation. *Water Science and Technology,* 68 (9), 1984-1993.
- Olcina, J. (1994). *Riesgos climáticos en la Península Ibérica*. Ed. Penthalon, Madrid.
- Olcina, J. (2004). Riesgo de inundaciones en la ciudad y término de Alicante. En: A. Gil Olcina, J. Olcina Cantos y A.M. Rico Amorós (eds), *Aguaceros, aguaduchos e inundaciones en áreas urbanas alicantinas.* 435-480. Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante.
- Olcina, J. (2008). Cambios en la consideración territorial, conceptual y de método de los riesgos naturales. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 270 (24). http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-270/sn-270-24.htm
- Olcina, J., Saurí, D., Hernández, M. and Ribas, A. (2016). Flood policy in Spain: a review for the period 1983-2013. *Disaster Prevention and Management: an International Journal*, 25 (1), 41-58.
- Ollero, A. (2015). Un necesario cambio de visión y de estrategia en la gestión de las inundaciones, *Tecnoaqua*, 12,122-124.
- Palerm, J. (2002). *Antología sobre Pequeño Riego. Sistemas de riego no convencionales* vol. III. Colegio de Postgraduados, México D.F.
- Pérez de las Heras, B. (2015). La adaptación al cambio climático en la Unión Europea: límites y potencialidades de una política multinivel. *Revista electrónica de estudios internacionales*, 29, 1-21. https://doi.org/10.17103/reei.29.11.
- Prokop, G., Jobstmann, H. and Schönbauer, A. (2011). *Overview on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects in EU-27*. Environment Agency Austria, Wien.
- Raymond, C.M., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R., Kabisch, N., de Bel, M., Enzi, V., Frantzeskaki, N., Geneletti, D., Cardinaletti, M., Lovinger, L., Basnou, C.,Monteiro, A., Robrecht, H., Sgrigna, G., Munari, L. and Calfapietra, C. (2017). *An Impact Evaluation Framework to Support Planning and Evaluation of Nature-based Solutions Projects.* Report prepared by the EKLIPSE Expert Working
- Group on Nature-based Solutions to Promote Climate Resilience in Urban Areas. Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford.
- Rodríguez M.I. (2005). El agua y la ciudad de hoy. *Equipamiento y Servicios Municipales*, 117, 18-38.
- Rodríguez, M.I., Cuevas, M.M., Martínez, G. and Moreno, B. (2014). Planning criteria for water sensitive urban design. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 191, 1579-1591.
- Sales-Ortells, H. and Medema, G. (2015). Microbial health risks associated with exposure to stormwater in a water plaza. *Water Research*, 74, 34-46.

- Saunders, N.J., and Peirson, W.L. (2013). Climate change adaptation of urban water management systems in the wet/dry tropics, *Australian Journal of Water Resources*, *17* (2), 180-192.
- Saurí, D. and Palau-Rof, L. (2017). Urban drainage in barcelona: From hazard to resource?. *Water Alternatives* 10 (2), 475-492.
- Sayers, P., Yuanyuan, L., Galloway, G., Penning-Rowsell, E., Suxin, S., Tank, W., Yiwei, C. and Le Quesnet, T. (2013). *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. UNESCO, Paris.
- Sedlak, D. (2014). *Water 4.0. The past, present and future of the World's most vital resource*. Yale University Press, New Haven.
- Schmidt-Thomé, P. (edit) (2005). *The spatial effects and management of natural and technological hazards in Europe*. ESPON, (thematic project 1.3.1.), https://www.preventionweb.net/files/3621_Finalreport.pdf
- Shun Chan, F. K., Griffiths, J. A., Higgitt, D., Xu, S., Zhu, F., Tang, Y.T., Xu, Y., & Thorne, C.R. (2018). "Sponge City" in China. A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy*, 76, 772-778. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005
- Sitzenfrei, R., Möderl, M. and Rauch, W. (2013). Assessing the impact of transitions from centralised to decentralised water solutions on existing infrastructures - Integrated city-scale analysis with VIBe, W*ater Research*, 47 (20), 7251-7263. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.038
- Suleiman, L., Olofsson,B. Saurí, D. and Palua-Rof, L (2020). A breakthrough in urban rain-harvesting schemes through planning for urban greening: Case studies from Stockholm and Barcelona. *Urban Forestry & Urban Greening*, 51, 126678. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126678
- Vallès-Casas, M. March, H. and Saurí, D. (2016). Decentralized and user-led approaches to rainwater harvesting and greywater recycling: The case of sant Cugat del Vallès, Barcelona, Spain, *Built Environment*, 42(2), 243-257.
- Vargas, J. and Paneque, P. (2017). Methodology for the analysis of causes of drought vulnerability on the River Basin scale, *Natural Hazards,* 89, 609–621. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2982-4
- Vargas, M.V., Rovira, M.R., Gabarrell, X. and Villalba, G. (2014). Cost-effective rainwater harvesting system in the Metropolitan Area of Barcelona. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 63 (7), 586-595.
- Wella-Hewage, C.S., Hewa, G.A. and Pezzaniti, D. (2016). Can water sensitive urban design systems help to preserve natural channel-forming flow regimes in an urbanised catchment? *Water Science and Technology*, 73 (1), 78-87. https://doi.org/10.2166/wst.2015.464

CRECIDAS, INUNDACIONES Y RESILIENCIA: RESTAURACIÓN FLUVIAL CONTRA LOS FALSOS MITOS

Alfredo Ollero Ojeda
Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza
aollero@unizar.es
https://orcid.org/0000-0002-9745-5866

RESUMEN

La percepción sobre crecidas e inundaciones fluviales y la gestión del riesgo han estado determinadas durante décadas por una visión muy reducida y sesgada, apoyada en falsos mitos y en malas prácticas ambientales. En los últimos años se han sentado algunas bases para un necesario y urgente cambio de visión que debe ir conduciendo hacia la resiliencia territorial de los espacios fluviales. La restauración fluvial se convierte en estrategia y herramienta de este cambio, aportando a la ordenación del territorio la propuesta clave de devolver espacio a los ríos, un espacio o territorio fluvial que gestiona y regula los eventos extremos y que dota de resiliencia al propio río y a la sociedad, que debe adaptarse y concienciarse, desterrando los viejos mitos. En este momento de inflexión se explican estas ideas y se presenta el caso representativo del curso medio del río Ebro, que vive este proceso de cambio de visión no exento de dificultades.

1. INTRODUCCIÓN

Crecidas e inundaciones son procesos naturales imprescindibles para el correcto funcionamiento fluvial y para el equilibrio planetario. Son procesos extremos frecuentes y universales, muy bien definidos espacialmente por cuanto acontecen en cauces y llanuras de inundación y, por tanto, muy fácilmente predecibles. La carga negativa que acompaña a estos procesos extremos deriva de sus daños socioeconómicos y se alimenta desde un enfoque antrópico tergiversado dominado por intereses particulares y falsos mitos tradicionales.

La presente aportación constituye una reflexión sobre la problemática de los riesgos asociados a sistemas fluviales, tanto la inundación como la erosión, en un contexto actual de cambio. Como tal reflexión y al tratarse de una ponencia invitada, no se estructura en la forma clásica de un artículo científico, sino que se focaliza en la discusión y en las propuestas, a partir de la experiencia previa del autor. No hay un área de estudio definida, es una propuesta aplicable a cualquier espacio fluvial, pero se va a tratar como ejemplo actual con mayor atención el caso del curso medio del río Ebro.

El principal objetivo de este trabajo es contribuir a un necesario y urgente cambio de visión en las crecidas e inundaciones, en las estrategias de gestión del riesgo y en las soluciones concretas. La propuesta conduce a la resiliencia territorial como meta y se basa en la restauración fluvial como herramienta clave de actuación.

2. CRECIDAS E INUNDACIONES FLUVIALES EN PERSPECTIVA HIDROMORFOLÓGICA

Crecidas e inundaciones son procesos hidrológicos y geomorfológicos complejos, por lo que deben ser considerados ante todo desde una perspectiva hidromorfológica. Otras perspectivas –biológicas, ambientales, sociales– son válidas y enriquecedoras, pero no pueden ser prioritarias porque condicionan y pueden alterar la correcta percepción y valoración de estos procesos extremos. De hecho, existe una generalizada consideración negativa de estos fenómenos naturales, acompañada de un extendido y a veces intencionado desconocimiento, que es en buena medida responsable del enorme y creciente deterioro ambiental de muchos cursos fluviales (Ollero, 2014).

Así pues, desde una perspectiva hidromorfológica, las crecidas e inundaciones fluviales son procesos clave en el ciclo del agua y en el ciclo geomorfológico, constituyendo el motor de la dinámica fluvial a través de los mecanismos de erosión, transporte y sedimentación en los cauces. Crecidas e inundaciones son así procesos i) que construyen y dimensionan los propios cauces, creando geodiversidad, ii) que actúan de forma autorregulada, ya que cuentan con herramientas propias de distribución de materia y de disipación de energía, iii) y que controlan, dirigen y favorecen todos los procesos ecológicos, creando también biodiversidad (Ollero, 2017).

De acuerdo con Malavoi y Bravard (2010) la hidromorfología reúne las dos variables externas, independientes o de control (a escala de tramo) que rigen todo el funcionamiento fluvial: el agua (caudal líquido) y los sedimentos (caudal sólido). Los ríos, los barrancos, las ramblas, una simple cárcava, son sistemas naturales dinámicos y complejos cuya función en el planeta es el transporte de agua y sedimentos desde cualquier rincón del continente hasta el mar. Y esta función, este trabajo, se realiza fundamentalmente en crecida, es decir, cuando hay un caudal hídrico suficiente para la movilización de los materiales. Puede definirse así la crecida fluvial como un proceso en el que circula por el cauce una corriente de agua con capacidad geomórfica, es decir, capaz de erosionar lecho y orillas, poner en movimiento los materiales, transportarlos y depositarlos aguas abajo. Y puede definirse la inundación fluvial como un proceso igualmente complejo en el que los límites (orilla llena o *bankfull)* del cauce menor han sido desbordados por la corriente, siendo ocupado por tanto el cauce mayor o llanura de inundación, en la que también puede aflorar agua desde el freático sin necesidad de desbordamiento.

Con el trabajo en crecida, cada cárcava, cada torrente, cada río, contribuyen tanto al equilibrio del ciclo hidrológico planetario (hidrología) como a la regulación (destrucción y construcción) del relieve del planeta (geomorfología) y a la distribución de elementos, nutrientes y seres vivos (ciclos biogeoquímicos), conformando un gran sistema circulatorio de capilares, venas y arterias naturales del territorio. La puesta en valor de este impresionante, pero muy desconocido por el gran público, sistema hidromorfológico natural es el punto de partida para cualquier consideración ambiental y para cualquier propuesta de gestión (García et al., 2020).

Por tanto, las crecidas e inundaciones no solo son positivas para el funcionamiento del planeta, sino que son imprescindibles. Sin estos procesos extremos el sistema fluvial colapsaría y con ello la salud ambiental en todas sus dimensiones. Esta es la base para enfrentarse a los falsos mitos sobre este tema y para la implementación necesaria y urgente de una nueva visión en la gestión del riesgo.
Las crecidas construyen los cauces y dinamizan todo el funcionamiento fluvial, distribuyen y clasifican los sedimentos y la madera muerta, generan nuevos hábitats, limpian y descontaminan, recargan los acuíferos, controlan las poblaciones de seres vivos y eliminan invasoras, conectan el cauce con los terrenos inundables intercambiando alimentos y fertilizando, aumentan las poblaciones piscícolas, proporcionan arena a las playas, etc. Con su irregularidad hidrológica, con sus crecidas, los ríos conforman corredores biológicos y bioclimáticos, crean paisaje, infraestructura azul y verde,

patrimonio natural, identidad territorial, y se convierten en excelentes indicadores ambientales y del cambio climático.

En consecuencia, lejos de causar daños y perturbaciones al sistema natural global, las crecidas lo mantienen, lo equilibran, lo fortalecen, le aportan salud y resiliencia, son fundamentales para el buen estado ecológico de las masas de agua europeas que exige la Directiva 2000/60/CE. Las crecidas no pueden ni deben evitarse, puesto que son necesarias para todas las funciones del río. Una sociedad inteligente debe ser capaz de adaptarse a este funcionamiento, absorbiendo también los beneficios de crecidas e inundaciones y consiguiendo así también resiliencia. Esta manifestación doble de resiliencia, la natural o fluvial y la antrópica o social, es la que nos llevará, como veremos, al nuevo paradigma de resiliencia territorial como objetivo de gestión.

3. FALSOS MITOS Y PROBLEMAS DE PERCEPCIÓN Y DE GESTIÓN

En la actualidad y de forma muy marcada desde hace varias décadas, el productivismo y el consumismo propios del capitalismo rigen toda la actividad humana, generando notables impactos sobre los sistemas naturales. Este sistema socioeconómico promueve con mucha intensidad, tanto de forma premeditada como subconsciente, un conjunto de valores, principios y estrategias de apropiación del espacio y de uso de recursos, sólidamente justificados por paradigmas de progreso y bienestar. Para el éxito de todo ello se considera fundamental reducir todo lo posible la irregularidad de los procesos naturales, luchándose por estabilizarlos, reducirlos o controlarlos. En este contexto, lo natural y salvaje del medio se considera siempre negativo, mientras lo domesticado y regularizado es positivo. Llevado a los ríos, las crecidas e inundaciones son siempre y radicalmente negativas, solo se hace eco de los daños que generan, se desconocen o se ocultan los beneficios, y hay que luchar con todos los medios posibles contra ellas.

Los mecanismos psicológicos y sociológicos que alimentan esta visión negativa son complejos y han sido poco estudiados, pero se observan de forma nítida y contundente en estudios de percepción (e.g. Marcén y Ollero, 2015; Ruiz Villanueva et al., 2017; Valette et al., 2019). Probablemente parten de un ancestral instinto de supervivencia, se asientan en una mentalidad colectiva tradicional que es aún dominantemente agraria, y se han fomentado e intensificado en las últimas décadas desde los poderes económicos.

Entre estos mecanismos se encuentra el propio lenguaje común, con el empleo de términos peyorativos (maleza, malas hierbas, basura) y eufemismos (limpieza de cauces). Pero para dar más intensidad a lo negativo de los procesos naturales se recurre con frecuencia a crear falsedades, en forma de teorías, lugares comunes, prejuicios y creencias asumidas unánimemente sin poner en duda y sin demostración científica, o bien medias verdades parciales y sesgadas. Es lo que podemos denominar falsos mitos (Ballester y Jiménez, coord., 2013), que condicionan en gran medida la gestión fluvial, y que en los últimos tiempos se alimentan también día a día con las cada vez más usuales fake news.

Los principales falsos mitos, ideas erróneas y prejuicios asociados a crecidas e inundaciones fluviales pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- **“Los ríos son corrientes continuas de agua”.** Esta pésima definición de la RAE, asimilada por todas las personas desde la etapa escolar, constituye un error mayúsculo que destruye y desprecia la complejidad fluvial, la capacidad de cambio y la dinámica de estos sistemas naturales. Además, elimina los cauces secos de cualquier consideración positiva. Es urgente superar esta visión tan reduccionista y educar sobre la complejidad y diversidad de estos sistemas naturales y de sus procesos extremos, porque el caudal nunca es continuo y nunca es

solo agua, porque el río es también la zona inundable y todo el acuífero, porque cuando el cauce está seco también es río, y cuando una crecida lo inunda todo también lo es. Para sensibilizar sobre crecidas e inundaciones hay que comenzar por hacer entender cómo es un río en todas sus dimensiones y funcionamiento.

- **"Ríos y agua son recursos productivos y el agua se pierde en el mar".** Este mito se consolidó con el regeneracionismo de finales del siglo XIX y se ha desarrollado considerablemente, como símbolo de progreso, con el Antropoceno (desde ~1950), realimentándose con los otros mitos. La idea básica es que hay que aprovechar el agua hasta la última gota, lo cual justifica la construcción de embalses. Según este mito, que el agua llegue al mar es perderla, constituyendo un gran desperdicio el agua de las crecidas no aprovechada. Este pensamiento ha originado conflictos interregionales y enormes impactos y desequilibrios ambientales y económicos, a raíz del consumo exacerbado del agua y también de los sedimentos y de los espacios fluviales. Los ríos afectados han perdido caudal, se han estrechado y han registrado procesos de incisión. El mar también ha sufrido graves efectos por no recibir nutrientes y sedimentos. Estos graves desequilibrios generados son difícilmente recuperables, pero se impone trabajar contra este mito reduciendo todos los consumos y restaurando los cauces afectados. Hay que dejar pensar en el agua y el río como producto o recurso, para considerarlo un sistema natural que nos aporta múltiples servicios siempre que se encuentre en buen estado y con unos usos ajustados y sostenibles (Magdaleno, 2011b).
- **"Crecidas e inundaciones son catástrofes"**. Solo se valoran los daños, nunca los beneficios. Los medios de comunicación se hacen eco de los bienes perdidos y de las personas afectadas, pero no explican ni dan valor a los beneficios de las crecidas, que son para el río, para el mar y para el conjunto de la sociedad. Este catastrofismo es interesado y justifica actuaciones que generarán falsa seguridad. Es evidente que las zonas inundables se inundan, que se conoce perfectamente hasta dónde llega el río y está bien cartografiado, por lo que sufrir daños tiene una parte importante de falta de adaptación, negligencia e imprudencia (foto A, figura 1). La memoria histórica se pierde con facilidad, cada nueva inundación es la mayor que se recuerda, cuando en realidad no es así. Todas estas percepciones falsas alimentan notables y eternos conflictos entre ribereños, científicos y gestores. Es clave, pero de máxima dificultad, el cambio de visión en esta línea.
- **"Hay inundaciones porque faltan embalses"**. El mito del embalse como infraestructura maravillosa, que permite varios usos económicos del agua y además lamina caudales reduciendo las crecidas, se ha establecido y desarrollado con el Antropoceno. Incluso en los textos escolares los embalses son un gran éxito humano sin ningún tipo de impacto negativo. Los gobiernos los han considerado actuaciones de interés general, cuando en realidad sólo benefician a partes pequeñas de la sociedad, y perjudican a todos los ríos. Las grandes constructoras siguen promocionándolos, considerando la hidroeléctrica una energía verde y limpia, lo cual es falso. La administración hidrológica elogia su papel laminador en cada crecida, exponiendo la reducción del caudal punta, pero no suele mencionar el efecto negativo de que la crecida y la inundación sean mucho más largas en el tiempo. El nivel de los embalses es un indicador muy publicitado en los medios de comunicación y hasta protagoniza conversaciones de ascensor; por supuesto, que los embalses estén llenos se considera excelente: "cuánta agua tenemos". Sin embargo, si el embalse está lleno no puede laminar crecidas, e incluso puede incrementarlas si es necesario un desembalse para evitar el colapso de la presa. Es una demanda social generalizada pedir más embalses cuando se sufren los daños de crecidas e inundaciones. Pero la realidad es que es una "solución" deficiente, que incrementa el consumo de agua y la evaporación, que genera falsa seguridad, peligrosa en su gestión, y sobre todo que destruye ríos, in situ y aguas abajo. El embalse no puede con todas las crecidas, pero sí absorbe muchas y reduce su número y su caudal (Ibisate, 2005), y esto es muy negativo para el funcionamiento geomorfológico y ecológico fluvial, con impactos irreversibles e intensas perturbaciones ambientales que afectan negativamente al ser humano.

Para laminar crecidas y reducir los efectos negativos de las inundaciones hay múltiples medidas mucho mejores que los embalses, que deberían ser definitivamente descartados para estos fines.

- **"Los sedimentos son basura y enfermedad del río".** En documentos de la administración, en debates, en tertulias periodísticas, en discursos de responsables públicos, se considera con frecuencia y absoluto desconocimiento que los materiales aluviales de los cauces son basura, desechos que hay que eliminar, o incluso enfermedades del río que hay que curar mediante extracciones o dragados, ya que lo que se considera normal o sano en un río es que luzca agua superficial. Este desprecio social por las gravas a la vista es evidente en los estudios de percepción (e.g. Le Lay et al., 2013; Valette et al., 2019). El temor por los elementos leñosos (madera muerta) y su capacidad para "taponar" también es proverbial (Ruiz Villanueva et al., 2018). El problema alcanza incluso hasta al conservacionismo, que es muy biocentrista (no se protege el río sino una especie emblemática) y no ve con claridad que la base del correcto funcionamiento fluvial es precisamente hidromorfológica y que los sedimentos son la clave de la buena salud fluvial (Horacio, 2015). Y en la gestión aún no se contempla que el déficit de sedimentos provoca en los cauces procesos muy negativos e irreversibles.
- **"Los cauces están sucios, hay que limpiarlos".** Es consecuencia del mito anterior y posiblemente constituye el falso mito socialmente más extendido. Es un auténtico mantra, repetido en cada evento, en cada declaración pública, en cualquier opinión popular. La limpieza suele consistir en arrasar con maquinaria todo el lecho fluvial, arrancando vegetación y sedimentos y acumulando estos en las orillas (fotos C y F, Figura 1). La madera muerta o sedimento leñoso también es objeto de estas prácticas y suele ser eliminada a pesar de su enorme valor generador de hábitats. Se producen enormes daños en el río y no se soluciona nada, puesto que en los primeros momentos de la siguiente crecida los procesos hidromorfológicos reequilibran totalmente el cauce. Pese a ser inútil, mero placebo, es una práctica que se repite a modo de mito de Sísifo, con presupuestos anuales sistemáticos, ante la continua demanda social de la misma.
- **"La erosión es mala, hay que impedirla".** La erosión es un proceso natural imprescindible en el funcionamiento del planeta, que sin embargo ha sido totalmente demonizado desde antiguo, ya que se asocia con pérdida de terreno y de propiedad. Pero evitar la erosión genera desequilibrios graves e implica, por ejemplo, impedir la sedimentación. Si no se puede destruir el terreno tampoco se podrá construir más abajo, no habrá materiales para ello. El problema de este falso mito en las orillas de los ríos es que requiere importantes inversiones y continuo mantenimiento, además de generar importantes afecciones en el cauce con repercusiones aguas abajo.
- **"Tras una crecida hay que actuar y ampliar la sección de desagüe".** Este falso mito justifica las obras de emergencia postcrecida, asociadas también, como se ha visto, a las limpiezas. Son actuaciones muy negativas que se apoyan en la idea errónea de que toda movilización o acumulación natural de sedimentos es mala porque tapona o hace crecer al cauce incrementando los desbordamientos. Está demostrado que no es así, y que la mayoría de los ríos no sufren acreción, sino el problema inverso, la incisión (fotos D y H, Figura 1). Las acciones de remoción de sedimentos para lograr sección de desagüe carecen de control ambiental y gastan dinero público en intervenciones inútiles y de gran daño ambiental (Ollero, 2019), pero son muy visuales y tranquilizan falsamente a la población. El problema es que se hace pedagogía inversa: se presentan unas muy malas prácticas como acciones adecuadas y convenientes, con lo que se engaña a la población y se realimentan la percepción social equivocada y sus demandas. En suma, se está mintiendo sobre los ríos al ofrecer soluciones que no lo son.
- **"La solución para las inundaciones es encauzar".** Las medidas duras se han considerado siempre como las únicas eficaces. No plantean dudas ni se buscan alternativas. Si no se ejecutan no es porque no se deba, sino porque no se puede (e.g. por falta de presupuesto). Sin

embargo, pueden generar procesos contraproducentes en el cauce, agravar la peligrosidad y prolongar la inundación al no poder regresar las aguas a su cauce (foto A, Figura 1). Los encauzamientos pueden ser efectivos contra pequeñas crecidas, lo cual puede incrementar la falsa seguridad y la exposición, de manera que en eventos extraordinarios se pueden producir situaciones dramáticas por superación o ruptura de una estructura que ha alterado definitivamente la capacidad autorreguladora y autolaminadora del cauce natural. Desde la ordenación del territorio se puede superar este falso mito con estrategias para dar espacio y reducir la vulnerabilidad (Ollero e Ibisate, 2012).

- **"Restaurar es estabilizar orillas y crear parques fluviales".** Este último falso mito no es algo que se diga o se escriba, sino que directamente se da por hecho y se hace. La gran mayoría de proyectos de restauración incluyen, desde los inicios de estas prácticas (Kondolf, 1998; Wohl, 2005), medidas de estabilización de las márgenes, mediante técnicas de bioingeniería, supuestamente "suaves" y "ecológicas", pero que pretenden y consiguen evitar la erosión y la migración del cauce. Y por definición, como veremos, restaurar implica recuperar la dinámica natural, por lo que nunca puede conllevar impedir esa dinámica estabilizando el cauce. No hay nada más lejos de la auténtica restauración, que debería consistir precisamente en liberar al río y volver a permitir sus procesos naturales de erosión y sedimentación. Hay que dejar de llamar restauración a lo que no lo es, y este es un caso muy claro: muchos proyectos engañan buscando la estabilidad, la estética y la accesibilidad en vez de la estructura y el funcionamiento natural.

Estos falsos mitos han impregnado totalmente la percepción social de los ríos y de las crecidas e inundaciones. Pero, lo que es más grave, han dirigido de forma unívoca y persistente la gestión del agua y de los riesgos asociados (Olcina, 2018), e incluso han falseado y pervertido la restauración fluvial (Ollero, 2011). La gestión de las inundaciones no puede basarse en este tipo de actuaciones repetitivas de nula eficacia, pero que por inercia e intereses se siguen ejecutando.

Las consecuencias de la puesta en práctica durante décadas de malas acciones apoyadas en estos falsos mitos son un deterioro ambiental sin precedentes en los sistemas fluviales y un incremento del riesgo por exposición y vulnerabilidad (Figura 1). Desde mediados del siglo XX se ha actuado en una lucha frontal contra el funcionamiento dinámico de los ríos y contra sus crecidas e inundaciones (Olcina et al., 2016). Ello ha supuesto una inversión económica enorme y continua, con costes globales muy superiores a los discutibles beneficios. Se ha implantado así un sistema de defensa basado en presas, diques, escolleras, dragados y limpiezas que no ha sido eficaz y que ha generado falsa seguridad, con ello mucha más exposición y con ello crecientes daños y pérdidas económicas. Se han invadido los territorios fluviales y se han estabilizado y constreñido los cauces, rompiéndose los procedimientos naturales de autorregulación ejercidos por el río en crecidas e inundaciones.

Pero los falsos mitos pueden ser rebatidos con ideas y alternativas de acción coherentes y aplicables (Tabla 1). Desde el ámbito científico se han denunciado y se han pensado alternativas al menos desde hace 4 décadas, hasta ahora con escaso éxito. Solo en los últimos años la administración hidrológica y ambiental ha comenzado a contemplar e implementar algunos cambios, todavía muy modestos. Precisamente en una situación actual de emergencia climática y bio-sanitaria todavía es más urgente y necesario conseguir un cambio de paradigma que lleve a objetivos de salud ambiental, naturalidad, sostenibilidad, adaptación y resiliencia. Pero este cambio es muy complicado sin superar el modelo socioeconómico imperante productivista y consumista. Así, la salida a la actual crisis parece que se vuelve a enfocar acelerando en este modelo, en vez de decreciendo, lo cual sigue comprometiendo nuestra supervivencia como especie.



Figura 1. Impactos y malas prácticas asociados a falsos mitos. A) Crecida del Ebro (2018, Juslibol, Zaragoza) en la que la mota de defensa impide el retorno del agua desbordada al cauce. B) Encauzamiento del barranco de las Casas (Puebla de Alfindén, Zaragoza) que ha reducido a la mitad la sección del barranco. C) Dragado postcrecida en el río Arba (Rivas, Zaragoza). D) Incisión causada por antiguas extracciones en el río Cordevole (Ponte Mas, Italia). E) Vado y alteración geomorfológica en el río Yalde (Castroviejo, La Rioja). F) Dragado para obtener sección de desagüe en el torrente Pettorina (Sottoguda, Italia). G) Ocupación urbana del río Ebro en Zaragoza, crecida de 2015. H) Incisión y escollera aguas abajo de una presa de retención de sedimentos en el río Aurín (Isín, Huesca). Fuente: elaboración propia.

Falso mito	Discusión y alternativa
"Los ríos son corrientes continuas de agua"	El río es mucho más que el cauce menor. El caudal es irregular. Hay que respetar y proteger cualquier sistema fluvial en toda su complejidad. Esfuerzo educativo y concienciación social.
"Ríos y agua son recursos productivos y el agua se pierde en el mar"	El caudal hídrico y el sólido tienen que llegar al mar, donde ejercen funciones fundamentales. Hay que reducir al mínimo imprescindible los usos consuntivos de agua y sedimentos. Este debe ser el objetivo prioritario de la planificación hidrológica: que los ríos funcionen y que lo que transportan llegue al mar.
"Crecidas e inundaciones son catástrofes"	Crecidas e inundaciones son imprescindibles para el buen funcionamiento y el buen estado tanto fluvial como marino. Aportan servicios ecosistémicos y múltiples beneficios al ser humano. Hay que respetar y proteger estos procesos extremos, y favorecerlos con desembalses, si es preciso, en ríos regulados.
"Hay inundaciones porque faltan embalses"	El papel de los embalses en los procesos de crecida e inundación es discutible y no siempre posible, generando consecuencias positivas y negativas. Hay que agotar todas las alternativas antes que construir nuevos embalses, estructuras obsoletas y muy dañinas para el sistema fluvial. Hay que informar a la población sobre sus múltiples efectos negativos. La mejor alternativa para laminar crecidas es embalsar en las llanuras de inundación, que cumplirán así su función.
"Los sedimentos son basura y enfermedad del río"	Los sedimentos son el río y tienen un papel clave en el sistema fluvial. El déficit de sedimentos genera procesos muy negativos e irreversibles. Una medida clave de restauración es aportar o devolver sedimentos al río y favorecer su movilización. Es muy necesaria y urgente la educación y concienciación social sobre los sedimentos fluviales, su valor y sus funciones.
"Los cauces están sucios, hay que limpiarlos"	Es un mantra sin fundamento científico. Eliminar sedimentos y vegetación es un atentado contra la integridad del sistema fluvial con consecuencias muy graves. Son las crecidas las que limpian y renuevan los cauces. La alternativa es no actuar y deberían ser definitivamente prohibidas las actuaciones de emergencia postcrecida. Hace falta una acción educativa y divulgativa extensa y contundente sobre este tema.
"La erosión es mala, hay que impedirla"	La erosión es un proceso imprescindible en el sistema fluvial. Precisamente en algunos casos habría que favorecerla para posibilitar la llegada de sedimento al cauce y su movilización. Solo si hay erosión funcionará el sistema y habrá sedimentación. Es urgente concienciar y formar en esta línea.
"Tras una crecida hay que actuar y ampliar la sección de desagüe"	Una crecida reconstruye el cauce y dota al sistema de resiliencia. Cualquier acción humana posterior altera esa autorregulación natural. La sección de desagüe la construye el río para evacuar sus crecidas, no es necesario ampliarla. Solo podría contemplarse actuar en casos muy puntuales provocados por puentes o estructuras mal dimensionadas. La alternativa debería ser sustituir el puente o el vado por otro adecuado.

"La solución para las inundaciones es encauzar"	Encauzar provoca incisión, incrementa la velocidad y conduce los problemas a tramos no defendidos o los agrava donde se rompe la defensa. La solución es dar más espacio al río, todo lo contrario que encauzar: desencauzar y adaptar los usos a la inundabilidad, reduciendo así exposición y vulnerabilidad.
"Restaurar es estabilizar orillas y crear parques fluviales"	Los procesos fluviales son irregulares, de manera que los cauces y orillas son inestables por naturaleza. La restauración nunca puede ser estabilización, sino que, al contrario, debe buscar recuperar los procesos activos para que todo el sistema funcione. Es muy urgente educar al respecto y no fomentar más actuaciones estabilizadoras y estéticas con bioingeniería.

Tabla 1. Discusión y alternativas frente a los falsos mitos. Fuente: elaboración propia.

4. LA RESILIENCIA TERRITORIAL COMO NUEVO OBJETIVO Y LA RESTAURACIÓN FLUVIAL COMO HERRAMIENTA

Para promover el cambio necesario en la percepción y en la gestión del riesgo en crecidas e inundaciones es preciso modificar la visión y el abordaje del problema, cambiar de perspectiva y buscar nuevas bases de apoyo. Porque es evidente que el problema existe: la percepción de los procesos de crecida e inundación hasta ahora no ha sido adecuada y la gestión de los ríos y del riesgo no ha sido eficaz. Y que, como afirmaba Albert Einstein, no podemos resolver problemas pensando de la misma manera que cuando los creamos.

Las bases de apoyo para el cambio de perspectiva son, desde nuestra experiencia, i) emplear la hidromorfología como clave de funcionamiento fluvial y enfoque de trabajo, ii) la puesta en valor de ríos, crecidas e inundaciones como patrimonio natural, iii) la restauración fluvial como herramienta de trabajo, con base hidromorfológica y adaptativa y con la medida clave de dar más espacio al río (territorio fluvial), iv) la ordenación del territorio adaptada al río y asociada a la restauración y a la gestión, y v) la resiliencia territorial como meta a lograr para que la vulnerabilidad sea mínima y el riesgo asumible.

4.1. Resiliencia territorial

La idea de resiliencia territorial (Méndez, 2016; Marquínez et al., 2017; Berga, 2017) implica la integración de la resiliencia natural o ecológica, en este caso fluvial, con la resiliencia social o humana. En el contexto de la gestión de los riesgos de inundación y erosión por crecidas e inundaciones, que siempre debe ser una gestión adaptativa (Vinet, 2010; Woodward et al., 2014), se trata de combinar el doble objetivo de la resiliencia social (medidas efectivas para la población) y de la resiliencia ecológica (medidas adecuadas y sostenibles). La promulgación en Europa de la Directiva 2007/60/CE de gestión de riesgos de inundación ha podido iniciar este importante cambio de tendencia al promover la integración de las resiliencias fluvial y social. Así, actualmente se avanza en sustituir medidas tradicionales de choque frontal por medidas adaptadas a la dinámica fluvial (De Bruijn, 2005; Batica y Goubersville, 2016). El cambio en el tipo de actuaciones se acompaña del cambio en la idea de gestión: i) la predicción y la emergencia son fundamentales y mejoran conforme aumenta el conocimiento hidrológico; ii) la prevención debe tener en cuenta los caracteres hidrológicos y geomorfológicos y estar conformada por medidas basadas en la naturaleza (Van Wesenbeeck et al., 2017) que se integren en la ordenación territorial (Perles et al., 2018); iii) un aspecto clave de la prevención y para la resiliencia social es la educación de la población, la conservación de la memoria y la experiencia y la sensibilización sobre los nuevos paradigmas de gestión y sobre el carácter adaptativo de un proceso que debe ser continuo en el tiempo (Hillman, 2009; Waylen et al., 2018).

En suma, las crecidas e inundaciones aportan al río resiliencia, es decir, dinámica, adaptación, autorregulación, autoprotección, buen estado, lo hacen más fuerte como sistema natural. Una buena gestión del riesgo, adaptada a la resiliencia fluvial, consigue resiliencia para el colectivo humano en riesgo. Las resiliencias fluvial y social son inseparables y deben avanzar en una misma línea integrada en la ordenación del territorio, por lo que podemos hablar de resiliencia territorial. La sociedad debería alcanzar una relación sostenible de convivencia con el río y con las crecidas (Morote y Souto, 2020).

4.2. Restauración fluvial

Restaurar es restablecer o recuperar un sistema natural a partir de la eliminación de los impactos que lo degradaban y a lo largo de un proceso prolongado en el tiempo, hasta alcanzar un funcionamiento natural y autosostenible. Un río restaurado habrá recuperado sus procesos naturales (crecidas, desbordamientos, erosión, sedimentación, colonización vegetal, etc.), su estructura en toda su complejidad y diversidad, sus funciones en el sistema Tierra (transporte, regulación, hábitat, etc.), su territorio, es decir, el espacio propio y continuo que debe ocupar para desarrollar todos sus procesos y funciones, su dinámica natural a lo largo del tiempo, su resiliencia o fortaleza frente a futuros impactos, su capacidad de auto-regulación y auto-recuperación y, por tanto, todos los bienes y servicios que aporta a la sociedad. En suma, el proceso de restauración debe lograr naturalidad, funcionalidad, dinamismo, complejidad, diversidad y resiliencia para el sistema natural fluvial. La auténtica restauración es, por tanto, auto-restauración. El río debe ser capaz de recuperarse solo progresivamente, a lo largo de un proceso, desde el momento en que se eliminen los impactos (Ollero, 2011).

Los objetivos de la restauración fluvial no deben ser una pretendida “belleza”, ni recreo, ni estabilidad, como es frecuente. Restaurar no es estabilizar, ni revegetar, ni ajardinar, ni urbanizar, ni maquillar ni camuflar.

La auténtica restauración fluvial debería ser fundamentalmente auto-restauración hidrogeomorfológica y requeriría caudales naturales, crecidas geomórficas, sedimentos movilizables, espacio (territorio fluvial) para el desarrollo de la dinámica natural, eliminar obstáculos longitudinales y transversales, y tiempo para la auto-recuperación. Sin embargo, esta auténtica restauración es prácticamente imposible, ya que los ríos, torrentes, barrancos y ramblas sufren numerosas presiones e impactos en toda su cuenca, la mayor parte de las cuales son de muy compleja eliminación. Si fuera posible eliminar todos esos impactos (presas, defensas, canalizaciones), la restauración fluvial sería rápida y efectiva, ya que unas pocas crecidas serían suficientes para recuperar todo el funcionamiento natural. Pero las enormes inercias sociales, los falsos mitos que hemos visto, ponen trabas insalvables a la restauración fluvial.

La restauración fluvial ha alcanzado ya una notable progresión y ofrece un amplio abanico de acciones, la mayor parte de las cuales son de utilidad en la gestión de crecidas e inundaciones (Tabla 2), como se ha demostrado en diferentes encuentros científico-técnicos en los últimos años. Sin duda la medida de restauración estrella para la gestión del riesgo es el territorio fluvial.

Gestión de crecidas e inundaciones	Restauración fluvial
-Conocimiento, evaluación y cartografía: • Panel científico–técnico–institucional permanente • Conocimiento y seguimiento hidrogeomorfológico del río • Delimitación del espacio inundable y cartografía de peligrosidad y riesgo • Ampliar cartografía y gestión a toda la red fluvial • Integrar sinergias con inundaciones urbanas y litorales • Evaluación permanente del riesgo	• Conocimiento del río y evaluación y seguimiento de la restauración • Participación y voluntariado local • Tutela de la restauración: Centro Ibérico (CIREF) y Europeo (ECRR) • Integración de restauración fluvial, gestión de riesgos y ordenación del territorio (administraciones públicas)

-Territorio fluvial: • Definición de un territorio para el río • Identificación y búsqueda participativa de soluciones para áreas en conflicto • Devolución efectiva de espacio al río • Conservación o restauración del funcionamiento del río • Humedales y áreas de expansión lateral • Rebaje de terrenos inundables sobreelevados	• Devolución de espacio al río (territorio fluvial), retranqueo motas • Caudales geomórficos, funcionales y reconexión hidrológica • Aportación de sedimentos • Reconexión de cauces • Recuperación de áreas afectadas por extracciones de sedimentos • Eliminación de especies invasoras • Creación de hábitats
-Ordenación en espacios inundables: • Declaración oficial de territorio de riesgo • Nuevos planes de ordenación territorial controlada en áreas inundables • Adaptación de usos del suelo a inundabilidad • Revisión de planes de ordenación urbana y normativas • Desurbanizar áreas inundables • Establecimiento de normas de construcción que mitiguen • Espacios urbanos abiertos junto al río • Evaluación de inundabilidad e impacto ambiental para cualquier actuación • Evaluación y control ambiental en actuaciones postcrecida • Sistema de seguros	• Desprotección de orillas y desencauzamientos • Libertad fluvial y no actuación postcrecida • Desurbanización, devolución urbana de espacio al río
-Puntos de especial riesgo: • Cartografía de detalle en confluencias y puntos singulares • Normativa restrictiva en confluencias y puntos especiales • Identificación y seguimiento de acumulaciones naturales • Reubicación y restauración geomorfológica de acumulaciones naturales peligrosas • Identificación y seguimiento de obstáculos antrópicos • Eliminación, redimensionamiento o traslado de obstáculos • Revisión de la utilidad y estado de todas las defensas • Sustitución de defensas de margen por bioingeniería y sistemas portátiles de protección • Cubrimiento o camuflaje de las defensas imprescindibles • Evitar o limitar acciones de alto impacto	• Demolición de presas y azudes • Eliminación de vados • Eliminación y permeabilización de obstáculos • Pasos y escalas para peces • Descanalizaciones • Restauración de la madera muerta • Revegetación
-Alerta, actuación, información y educación: • Refuerzo de la red S.A.I.H. como clave de alerta temprana • Planes de emergencia y cartografía de riesgo por rotura para todas las presas y embalses • Plan de emergencia local • Participación pública en protocolo de actuación, en mitigación y en plan de recuperación • Guardería fluvial preventiva • Programas de educación ambiental en el riesgo • Trabajar el riesgo de inundación en la educación reglada • Programas de formación técnica • Protocolo obligatorio de información del riesgo • Participación de los medios de comunicación • Redes de intercambio de las buenas prácticas • Planes comarcales y locales de gestión del riesgo	• Educación ambiental • Evaluación y denuncia de actuaciones negativas y falsas restauraciones • Guardería fluvial • Programas de formación

Tabla 2. Asociación de buenas prácticas en gestión de inundaciones y de acciones de restauración fluvial. Actualizado a partir de Ollero (2014, 2015).

4.3. El territorio fluvial

En la última década del siglo XX surgieron en diferentes países propuestas para respetar, considerar y recuperar como espacio fluvial las áreas aledañas a los cauces activos de los ríos (Dister et al., 1990; Ollero, 1992; Dutto, 1994; Brookes, 1996; Piégay et al., 1996; Malavoi et al., 1998; Ureña y Ollero, 2000; Vis et al., 2002). Se enfocaba en ocasiones como espacio inundable, en otras como corredor ribereño, en otras incluso como espacio erosionable y libre en el que el cauce pudiera mantener una dinámica en su trazado. Con el desarrollo conceptual y práctico de la restauración fluvial en los primeros años del siglo XXI, se ha consolidado el interés por esta idea de devolver espacio a los ríos, considerándose una acción básica para el éxito de los proyectos de restauración a pesar de las enormes dificultades de aplicación (Ollero e Ibisate, 2012; Fernández Orgaz et al., 2015). En nuestro país se optó por la denominación "territorio fluvial" en la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos (2007). Tras una década de escasa aplicación, en la actualidad se observa una decidida apuesta por este objetivo en el marco de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) exigidos por la Directiva 2007/60/CE, de manera que las administraciones hidrológicas son las que están comenzando a poner en práctica lo que desde el ámbito científico se pensó y se propuso durante 25 años.

De forma muy simple, el Territorio Fluvial consiste en devolver espacio al río e integrar y poner en valor éste como eje fundamental del territorio. Devolver espacio al río tiene el objetivo de que el sistema fluvial funcione mejor hidrológica, geomorfológica y ecológicamente y autorregule mejor sus procesos de crecida e inundación. Valorar el río como eje estructurador del territorio trasciende a todo el fondo del valle y supera los objetivos ambientales alcanzando los de gestión y ordenación.

El territorio fluvial es, hasta el momento, un concepto o paradigma, no una figura legal. En teoría, el territorio fluvial es el espacio del río, construido y dimensionado por los procesos hidrogeomorfológicos (crecidas), una banda ecogeomorfológicamente activa, eficaz y compleja como sistema natural. Debe ser ancho, continuo, inundable, erosionable, no defendido, con límites adaptados a la dinámica fluvial (Ollero, 2007). Las ideas que fundamentan la propuesta del territorio fluvial son las siguientes:

- Los ríos, y especialmente los de llanura, necesitan espacio para desarrollar su propia dinámica hidrogeomorfológica y ecológica. El río es mucho más que el cauce menor o activo, el río es también la ribera y la llanura de inundación.
- Un río con suficiente espacio funciona bien, cumpliendo sus funciones de transporte y autorregulación, así como sus funciones ecológicas. Esa autorregulación incluye los desbordamientos, la erosión y la sedimentación, las funciones de la vegetación y la movilidad geomorfológica. Precisamente un río dinámico con toda esa complejidad está más sano y en equilibrio, y es resiliente ante cada nuevo episodio extremo, como ya hemos señalado.
- La mayoría de los ríos han asistido en las últimas décadas a un proceso de estrechamiento y simplificación, en buena medida porque se ha consumido e invadido su espacio. Este proceso se debe a factores de cuenca, a la regulación con embalses y a las defensas y canalizaciones in situ. Y la consecuencia más frecuente del mismo es el incremento de la incisión, un problema muy grave en la actualidad en muchos cursos de agua. La libertad geomorfológica es clave para poder superar este grave deterioro de nuestros ríos. Devolver espacio al río puede frenar los procesos de incisión y de descenso del nivel freático, que constituyen también una tendencia probada relacionada con el cambio climático.
- Al crearse una banda fluvial ancha y continua, mejoran las conectividades longitudinal, transversal, vertical, temporal y social del río, tanto internas como con su entorno. Ello supone un espacio de gran valor ambiental.
- Por todo ello, devolver espacio al río es una medida fundamental de restauración fluvial, porque garantiza que el río pueda recuperar sus funciones, estructura y, por tanto, su funcionamiento como sistema natural.

- En el ámbito de la ordenación del territorio y el urbanismo, el territorio fluvial contribuye a vertebrar con el conjunto de la red fluvial y a integrar a los valles y ríos en el territorio y en la ciudad, promoviendo interacciones y flujos bidireccionales, involucrando al río en su sentido más amplio en todas las redes y conexiones.
- Además, en su implicación en la ordenación de usos del suelo, el territorio fluvial contribuye a reducir presión antrópica en las áreas inundables y con ello a disminuir la exposición y la vulnerabilidad de los elementos humanos implicados.
- Conseguir el espacio fluvial supone además cumplir con las directivas europeas Hábitats (92/43/CE), del Agua (2000/60/CE) y de gestión de riesgos de inundación (2007/60/CE), así como con el Dominio Público Hidráulico.
- En relación con las inundaciones, devolver espacio al río es una solución de sentido común que significa mejorar la capacidad de desagüe en la zona de flujo preferente en crecida, es decir, dotar al propio río de una mayor y mejor capacidad de laminación de los procesos, respetando y adecuando las funciones de las llanuras de inundación, objetivo de la Directiva.

El territorio fluvial puede enfocarse sólo como un espacio de inundación (medida para la gestión del riesgo) o también como un espacio de libertad para el cauce (medida de restauración) o como una adaptación de la ordenación del territorio a la dinámica fluvial. Así, debería ser un espacio con una regulación de usos del suelo compatible y adaptada a la inundación, a la erosión de márgenes y a la dinámica fluvial. Con ello, mitiga los riesgos, mejora los servicios ecosistémicos del río y refuerza la resiliencia social. Respetar y devolver al río el territorio fluvial es, ante todo, una medida inteligente. Frente a las habituales medidas de choque es una estrategia de adaptación y de resiliencia. Cuanto mejor respetemos y conservemos el territorio del río mejor funcionará el sistema fluvial y más beneficios nos aportará.

En suma, el territorio fluvial es una aportación a la ordenación del territorio y a la gestión de riesgos desde la restauración fluvial (Figura 2). Es el propio río restaurado el que ofrece su espacio como servicio, autorregulando crecidas e inundaciones a cambio de un espacio humano aledaño adaptado y menos vulnerable, consiguiendo con ello resiliencia territorial.

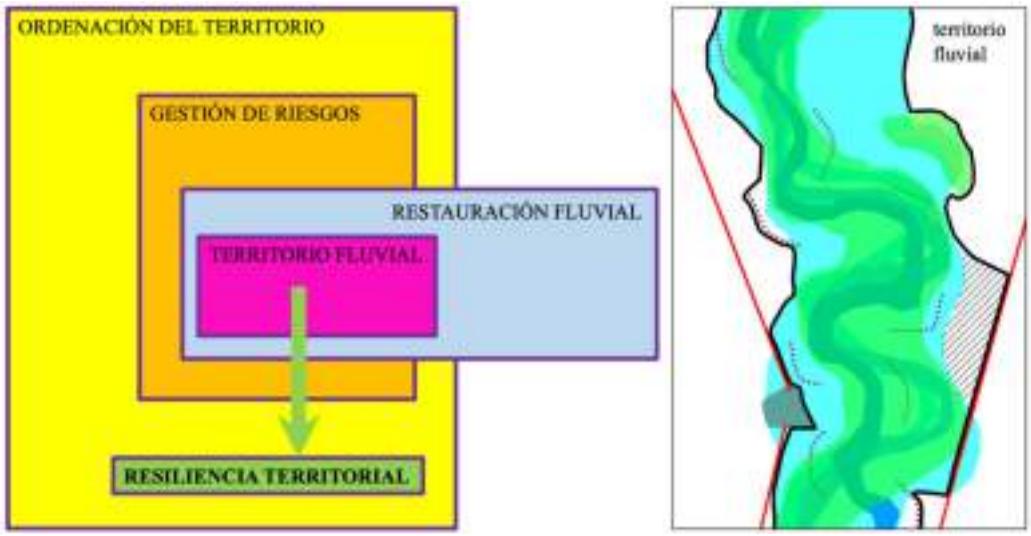


Figura 2. Restauración, territorio fluvial y gestión del riesgo. Fuente: elaboración propia

Pero, aun siendo una propuesta teóricamente sencilla e inteligente, el territorio fluvial es muy difícil de poner en práctica, de manera que los avances conseguidos hasta ahora pueden calificarse de escasos. Los logros en España son muy recientes y responden principalmente al esfuerzo de personas

concretas de la administración estatal del agua y de confederaciones hidrográficas. No se alcanzan los 150 km, destacando los logros en ríos de León y de Navarra, y constituyendo la propiedad privada el factor condicionante que ha frenado y reducido las posibilidades. La labor de concienciación y divulgación desarrollada desde el Centro Ibérico de Restauración Fluvial (CIREF) también ha contribuido a consolidar la idea explicando sus beneficios. El territorio fluvial ha aparecido también en proyectos recientes de planificación, como los que definen la infraestructura verde y azul de diferentes ciudades. Las perspectivas de futuro son esperanzadoras si se consigue el cambio de visión que se propone en este trabajo.

5. EL CASO DEL EBRO MEDIO

El curso medio del río Ebro y en concreto el tramo de meandros libres entre Logroño y La Zaida (340 km de cauce) constituye un ejemplo relevante a escala peninsular para analizar crecidas e inundaciones y la evolución en la gestión del riesgo (Ollero, 1992; Ollero et al., 2020). La llanura de inundación es muy extensa, 744 km2 en total, con 3,2 km de anchura media y 6,0 km de anchura máxima. La compleja dinámica fluvial ha estado muy marcada en las últimas décadas por el cambio global en la cuenca, especialmente por la regulación de caudales y la defensa frente a las crecidas, de manera que se ha asistido a una transformación importante del funcionamiento fluvial por factores antrópicos, con una gran aceleración de la intervención humana entre 1950 y 1990 (Ollero, 1992; 2010; Magdaleno, 2011a; Ollero et al., 2015; Díaz Redondo et al., 2018). Las crecidas del Ebro son frecuentes y suponen desbordamientos considerables, ya que las de periodos de retorno de 10 años ocupan el 80% de la superficie de la llanura de inundación (Ollero, 2010). Superan el umbral de movilización de sedimentos una media de 19 días al año y el umbral de desbordamiento una media de dos días al año (Ollero et al., 2020). La erosión de márgenes fue muy activa y lo seguiría siendo si no fuera por las defensas que constriñen el cauce. Ha habido una larga historia de continua migración y corta de meandros, así como avulsiones y cambios de estilo entre el meandriforme y el divagante tanto en el espacio como en el tiempo (Ollero et al., 2017).

La gestión del riesgo está constituida, por tanto, por medidas para reducir los daños por inundación y erosión, y ha evolucionado pudiendo identificarse 4 fases (Figura 3):

- Un periodo inicial aproximadamente hasta 1945 sin regulación de caudales y con muy escasas actuaciones de margen. Estas se iniciaron hacia 1900 y eran locales, en meandros concretos para evitar la erosión y con medios muy precarios. El embalse del Ebro, construido en cabecera (Reinosa) en 1945, marca el inicio de la regulación.
- Una fase de máxima actuación contra el río (1945-1990) que marca claramente en el contexto del Ebro medio la implantación del Antropoceno. Se va ampliando la regulación con embalses, destacando el de Yesa en el río Aragón (1960), y se desarrollan gran cantidad de obras de defensa de margen y kilómetros de motas tras las grandes crecidas de 1959 y 1960-61. A raíz de estas obras se pierde el miedo al río y se avanza con los cultivos hacia las orillas, reduciéndose progresivamente el espacio fluvial (Horacio et al., 2019) y aumentándose la
- exposición al riesgo. Un nuevo periodo de crecidas (junio 1977, invierno-primavera de 1978, diciembre 1980 y enero 1981) genera daños importantes y se desarrolla una nueva oleada de actuaciones de defensa que completan las motas e impiden ya totalmente la dinámica de cualquier meandro (Ollero, 1992, 2010; Najes et al., 2019), simplificando considerablemente el cauce (Ollero et al., 2015). Con todo ello se ha creado un sistema de defensa que destruye la dinámica fluvial, pero es poco eficaz y requiere un continuo mantenimiento, aunque la escasez de crecidas entre 1981 y 2003 parecen consolidarlo y da seguridad a la población

ribereña, que sigue incrementando la exposición agraria y urbana en zona inundable (Ollero et al., 2017).

- Una fase de concienciación científica (1990-2015). A lo largo de este periodo se alerta desde el ámbito científico sobre la fragilidad del sistema de gestión y se denuncia la destrucción del Ebro como sistema dinámico de meandros, único por sus dimensiones en la península. Esta preocupación cala muy escasamente en la sociedad, pero poco a poco va convenciendo al ámbito técnico, sobre todo desde la entrada en vigor de la Directiva 2000/60/CE, la elaboración del Plan Medioambiental del Ebro en 2005 y más aún a partir de la aprobación de la Directiva 2007/60/CE. Sin embargo, en la toma política de decisiones todavía se sigue manteniendo y consolidando el sistema tradicional de defensa.
- Una fase actual de cambio (2015-2020) que se inicia con la crecida de 2015 (2.691 m^3/s de caudal punta en el aforo de Castejón) y se asienta con la de 2018 (2.682 m^3/s), en la que los técnicos del organismo de cuenca consiguen ir poniendo en práctica sus criterios, procedentes de la concienciación científica que hasta ese momento no había sido tenida en cuenta. En esta fase es clave la exigencia europea de los PGRI, en su primera elaboración para el año 2015 y en su actual segundo ciclo hasta 2021. Sin embargo, este momento de cambio cuenta con una intensa oposición social en las localidades ribereñas, postura beligerante de asociaciones de "afectados por las riadas" que no ven con buenos ojos las nuevas medidas de gestión y pretenden continuar con el sistema de defensa tradicional. En el proceso de participación de la nueva estrategia Ebro Resilience se pone de manifiesto esta controversia. Pero esta estrategia es ya una nueva forma de actuar, se plantea a medio plazo y puede constituir un cambio de paradigma sin marcha atrás (Ollero et al., 2020).



Figura 3. Evolución de la percepción y gestión del riesgo en el Ebro medio en el último siglo y principales crecidas en los últimos 70 años. Fuente: adaptado de Ollero et al. (2020).

La estrategia Ebro Resilience surgió en 2018 dirigida por el actual MITERD a través del organismo de cuenca (Confederación Hidrográfica del Ebro). Forman parte también los gobiernos autonómicos de La Rioja, Navarra y Aragón, con la participación directa de las entidades locales y buscando el consenso de afectados, asociaciones y ámbito universitario. Su objetivo es la búsqueda de nuevos enfoques de actuación ante un problema complejo y un fenómeno natural inevitable: prevención, protección, preparación y reparación como medidas para la disminución del riesgo de inundación en el curso medio del Ebro, en el contexto del PGRI del Ebro (Gargantilla et al., 2020).

La estrategia incluye medidas predictivas, como la mejora en la toma de datos hidrológicos y la corrección de caudales, así como educativas, divulgativas y de implicación social. Pero las más destacables son las acciones que tratan de consolidar un nuevo sistema de prevención y defensa basado en dar más espacio al río. Hay que tener en cuenta que la última modificación del Reglamento del Dominio Público

Hidráulico (diciembre de 2016) plantea que en la medida de lo posible se tenderá a "aumentar el espacio (anchura) del cauce y no agravar la inundabilidad y el riesgo preexistente". Además, indica que sólo podrán construirse obras de defensa sobreelevadas lateralmente a los cauces en la zona de flujo preferente "cuando protejan poblaciones e infraestructuras públicas existentes".
En el reciente trabajo de Ollero et al. (2020) se han recopilado, cuantificado y cartografiado las medidas realizadas en la estrategia Ebro Resilience hasta mayo de 2020. En conjunto suman 120 actuaciones, con la retirada de más de 26 km de elementos lineales y el logro de 2.084 ha de superficie libre para el cauce (138 ha) y para la inundación (1.946 ha). Responden a la siguiente tipología:

- Eliminación y retranqueo de motas (diques longitudinales de tierra compactada). Se ha actuado hasta el momento en 18 casos que alcanzan en total más de 23 km lineales. El objetivo de su eliminación es lograr mayor espacio fluvial, un total de 595 ha hasta ahora, favoreciendo el desbordamiento y reduciendo la energía en la zona de flujo preferente. En la mayoría de los casos se ha realizado un retranqueo, es decir, se ha sustituido la mota eliminada por el refuerzo como defensa de un camino interior preexistente.
- Rebaje de motas. En 4 casos hasta el momento, que suman 3,1 km lineales, se ha optado por esta acción, que favorece en menor medida la mitigación de la presión hídrica en crecida. Por término medio supone la reducción de altura de la mota de ~3 m a ~1,5 m. Va asociada a la localización de compuertas y pretende la inundación controlada a partir de una cota próxima a la de caudal geomórfico.
- Áreas de inundabilidad temporal controlada. Se han establecido hasta el momento 9, con una superficie inundable total de 1,351 ha. Se asocian a núcleos de población y cuentan con una compuerta que las conecta con el cauce y que se utiliza para el llenado y el vaciado. Esta compuerta se localiza siempre aguas abajo del área, para que esta se inunde desde su cota inferior, a contrapendiente, de forma progresiva sin causar daños en el terreno. La primera en ejecutarse fue la de la localidad de Pradilla de Ebro y, junto con otras acciones asociadas, tuvo un comportamiento excelente para dicha localidad en la crecida de 2018.
- Cauces de alivio. También asociados a la mitigación de daños en las proximidades de núcleos de población. Fueron las primeras medidas proyectadas, hace ya más de una década, pero estuvieron muy discutidas y no hubo posibilidades de ejecución hasta 2015. Definitivamente se han realizado 6, pero es probable que no se realicen más, ya que parece optarse técnicamente por los "curages".
- "Curages". Consisten en la permeabilización de grandes masas de sedimentos vegetados mediante la apertura de ramales de libre circulación. Se consigue aumentar la capacidad de desagüe temporalmente, hasta que la propia dinámica fluvial y vegetal vuelva a cerrar esos ramales y requiera una nueva actuación. Entre 2018 y 2020 ha sido la acción más realizada, con un total de 35 actuaciones. Hay más proyectos de ejecución para los próximos años.
- Redistribuciones de sedimentos. En 5 casos se han realizado procedimientos de movilización de sedimentos con maquinaria dentro del cauce activo, extrayendo en una parte de la sección y acumulando en otra. Pretenden una mayor capacidad de desagüe temporal y modificar los flujos para evitar la dirección de la corriente contra el emplazamiento de una localidad (e.g. caso de Pradilla de Ebro).
- Perímetros de seguridad. Son un sistema de control de las aguas desbordadas en defensa de los núcleos urbanos. Se han implantado 12 hasta el momento. Se aprovechan infraestructuras existentes (caminos, carreteras, muros...) que se nivelan o recrecen para construir un cordón que rodee al casco urbano. Es necesaria la implantación de elementos de cierre y compuertas a lo largo del perímetro, así como hitos para seguir la evolución de los niveles in situ y establecer correlaciones altura/tiempo que ayuden a la toma de decisiones (por ejemplo, en el supuesto de una evacuación).
- Permeabilizaciones y retirada de obstáculos. Son acciones puntuales con las que se consigue capacidad de desagüe en lugares clave como puentes y proximidades a núcleos de población.

Destacan las acciones realizadas en el área del puente Boquiñeni-Pradilla o en los de Pina y Novillas, así como la eliminación del edificio del antiguo club de piragüismo de esta última localidad.

La estrategia Ebro Resilience puede considerarse pionera y original en nuestro país y se asocia con las NWRM (Natural Water Retention Measures) que se impulsan a nivel europeo (Cools et al., 2014; Strosser et al., 2014). Es una estrategia abierta, considera experimentales las medidas que va aplicando, se enfoca como un proceso de aprendizaje, son continuos la evaluación y el seguimiento, respondiendo, por tanto, a una gestión adaptativa. El concepto de resiliencia es apropiado y se enfoca desde una perspectiva integrada fluvial y socialmente. Sin embargo, son posibles pasos más ambiciosos que quizás puedan llegar en el futuro, como poder conseguir un auténtico territorio fluvial en el curso medio del Ebro en el que el río pueda fluir con mayor libertad y recuperar sus procesos de erosión e, incluso, corta de meandros. Ir, en suma, más allá del espacio de inundabilidad que ahora se está consiguiendo.

En el Ebro medio es preciso evaluar las actuaciones implantadas hasta el momento desde la mencionada perspectiva del aprendizaje y la gestión adaptativa. La eliminación de motas es la medida más adecuada y efectiva para dotar al río de espacio de inundabilidad. Es una acción claramente a ampliar en el futuro, constituyendo la base de la nueva gestión del riesgo. Las áreas de inundabilidad temporal controlada han resultado muy efectivas en las crecidas más recientes y también cuentan con varios proyectos de expansión. Estas medidas se concentran en las proximidades de los núcleos de mayor riesgo, pero se van a extender por todo el curso medio. Esto es importante, porque hace falta un sistema generalizado de espacios de inundación y solo entonces se alcanzarán los objetivos. Los cauces de alivio han mostrado menor eficiencia y necesidades de mantenimiento, por lo que es probable que no se ejecuten más. El curage es la acción actualmente más aplicada, ya que en suma son pequeños cauces de alivio que han venido a sustituir a los grandes. Pero es también una medida controvertida, por cuanto elimina vegetación natural. En algunos casos ha sido rechazado o se ha exigido que se aplicara solo en canales de crecida bien identificados. Es la actuación que más análisis y seguimiento requiere.

6. CONCLUSIONES

Todo lo expuesto constituye una propuesta general que pretende convertirse en un nuevo enfoque hacia las crecidas e inundaciones y su gestión, una nueva visión necesaria y urgente, que se está comenzando a aplicar en algunos ríos y que hay que consolidar.

Hay que partir de una perspectiva hidromorfológica para entender estos procesos extremos, ponerlos en valor, superar los 10 falsos mitos que se han identificado y explicado, y transferir un mejor conocimiento a la población para que esta aumente su memoria, su sensibilización, su convivencia con el riesgo y con ello su resiliencia.

La restauración fluvial con base hidromorfológica y adaptativa ofrece una medida clave para la gestión: el territorio fluvial o espacio para el río. Su aplicación supondría mejorar el funcionamiento fluvial y reducir la peligrosidad, y al integrarse con la planificación territorial conllevaría una adecuación de los usos al riesgo, es decir, una ordenación adaptada al río.

Con ello se alcanzaría la resiliencia territorial: el objetivo de integrar la salud del sistema fluvial, fortalecido por las crecidas necesarias, con la salud del sistema humano adaptado y sostenible, que puede convivir con esas crecidas sin daños.

AGRADECIMIENTOS

Algunas de las experiencias recientes que han servido de base para este trabajo se han adquirido en los estudios de campo desarrollados para la identificación de crecidas históricas y de respuestas fluviales a

eventos extremos de precipitación en el marco del proyecto CGL2017-83866-C3-1-R "El clima del último siglo en la España peninsular", financiado en el Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad (Ministerio de Economía, Industria y Competitividad).

REFERENCIAS

- Ballester, A. y Jiménez, N. (Coords., 2013). *Mitos del agua.* Informe para WWF (no publicado).
- Batica, J., Gourbesville, P. (2016). Resilience in flood risk management: a new communication tool. *Procedia Engineering,* 154, 811-817.
- Berga, L. (2017). Resiliencia territorial frente a las inundaciones. *Revista de Obras Públicas,* 3587, 74-81.
- Brookes, A. (1996). Floodplain restoration and rehabilitation. En: Anderson, M.G., D.E. Walling, P.D. Bates (eds.) *Floodplain processes,* 553-576, Wiley, Chichester.
- Cools, J., Strosser, P., Achilleos, E., Borchers, T., Ochs, S., Borchmann, A., Steinmann, E., Bussettini, M., Mattei Gentili, M., Gigliani, F., Cortellini, L., van de Glind, B., van de Veeren, R., Richardson, R., Brotherton, P., Baker, C., Mlinaric, M., DeBoisson, L., Fribourg-Blanc, B., Amorsi, N. (2014). *EU policy document on Natural Water Retention Measures.* Drafting team of the WFD CIS Working Group Programme of Measures (WG PoM), European Commission.
- De Bruijn, K.M. (2005). *Resilience and flood risk management: a systems approach applied to lowland rivers.* DUP Science, Delft.
- Díaz Redondo, M., Marchamalo, M., Egger, G., Magdaleno, F. (2018). Toward floodplain rejuvenation in the middle Ebro River (Spain): from history to action. *Geomorphology,* 317, 117-127.
- Dister, E., Gomer, D., Orbdlik, P., Petermann, P., Schneider, E. (1990). Water management and ecological perspectives of the Upper Rhine's floodplains. *Regulated Rivers Research and Management,* 5(1): 1- 15.
- Dutto, F. (1994) Proposta metodologica per la definizione della fascia di pertinenza fluviale (FPF) lungo il tratto piemontese del Po. Approccio geomorfologico. *IV Convegno Internazionale di Geoingegneria "Difesa e Valorizzazione del Suolo e degli Aquiferi",* 243-248, Torino.
- Fernández Orgaz, D., Robledo, M., Bielsa, J., Ollero, A. (2015). Análisis coste-eficacia para una propuesta de implantación del territorio fluvial en el río Odra (Burgos). *Actas del II Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restaurarios 2015,* 96-103, Pamplona.
- García, J.H., Ollero, A., Ibisate, A., Fuller, I.C., Death, R.G., Piégay, H. (2020). Promoting fluvial geomorphology to "make rivers work" in the Anthropocene era. *Geomorphology* (in press).
- Gargantilla, D., Calvo, A., Chopo, S., Polanco, L., Moreno, M.L., Pardos, M., San Román, J., Gómez, R. (2020). Prevención, protección, preparación y reparación: medidas para la disminución del riesgo de inundación en el eje del Ebro. *Boletín CIREF,* 12.
- Hillman, M. (2009). Integrating knowledge: the key challenge for a new paradigm in river management. *Geography Compass,* 3(6), 1988-2010.
- Horacio, J. (2015). *Medicina fluvial. Un nuevo paradigma en la conservación y restauración de ríos bajo el enfoque de la geomorfología.* Jolube, Jaca.
- Horacio, J., Ollero, A., Noguera, I., Fernández Pasquier, V. (2019). Flooding, channel dynamics and transverse infrastructure: a challenge for Middle Ebro river management. *Journal of Maps,* 15(2), 310-319.
- Ibisate, A. (2005). Variación del riesgo de inundaciones en el río Zadorra (País Vasco) como consecuencia de su regulación. *Investigaciones Geográficas,* 36, 119-133.
- Kondolf, G.M. (1998). Lessons learned from river restoration projects in California. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems,* 8, 39-52.
- Le Lay, Y.F., Piégay, H., Rivière-Honegger, A. (2013). Perception of braided river landscapes: implications for public participation and sustainable management. *Journal of Environmental Management,* 119, 1-12.

- Magdaleno, F. (2011a). *Evolución hidrogeomorfológica del sector central del río Ebro a lo largo del siglo XX. Implicaciones ecológicas para su restauración.* Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Magdaleno, F. (2011b). *¿Debe el agua de los ríos llegar hasta el mar? Una gestión medioambiental del agua en España.* Catarata, Madrid.
- Malavoi, J.R., Bravard, J.P., Piégay, H., Héroin, E., Ramez, P. (1998). *Determination de l'espace de liberté des cours d'eau.* SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon.
- Malavoi, J.R., Bravard, J.P. (2010). *Éléments d'hydromorphologie fluviale.* Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), Vincennes.
- Marcén, C., Ollero, A. (2015). Conocimiento geográfico aplicado a la cultura social del agua: las inundaciones. En: De la Riva, J., P. Ibarra, R. Montorio, M. Rodrigues (Eds) *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación,* 245-254, Universidad de Zaragoza y Asociación de Geógrafos Españoles, Zaragoza.
- Marquínez, J., Colina, A., Fernández Iglesias, E. y García de la Fuente, L. (2017). Resiliencia territorial ante catástrofes en el Cantábrico español. *Revista de Obras Públicas*, 3587, 54-63.
- Méndez, R. (2016). Del desarrollo a la resiliencia territorial: claves locales para la reactivación. En: Martínez Puche, A., X. Amat, I. Sancho y D. Sanchiz, *Profesionales y herramientas para el desarrollo local y sus sinergias territoriales. Evaluación y propuestas de futuro: IX Coloquio Nacional de Desarrollo Local del GTDL-AGE*, 51-78. Publicacions de la Universitat d'Alacant, Alicante.
- Morote, A.F., Souto, X.M. (2020). Educar para convivir con el riesgo de inundación. *Estudios Geográficos,* 81(288), e036.
- Najes, L., Ollero, A., Sánchez Fabre, M. (2019). Evolución y dinámica geomorfológica actual del río Ebro en la Reserva Natural Dirigida de los Sotos y Galachos (Zaragoza). *Cuaternario y Geomorfología,* 33(1-2), 47-63.
- Olcina, J. (2018). Verdades y mentiras sobre el riesgo de inundaciones en el litoral mediterráneo: balance de medio siglo. *Jornada sobre fenómenos meteorológicos extremos en el Mediterráneo.* AEMET, Valencia.
- Olcina, J., Saurí, D., Hernández, M., Ribas, A. (2016). Flood policy in Spain: a review for the period 1983-2013. *Disaster Prevention and Management,* 25(1), 41-58.
- Ollero, A. (1992). *Los meandros libres del río Ebro (Logroño-La Zaida): geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos.* Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Ollero, A. (2007). *Territorio fluvial. Diagnósico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos en el Ebro y los cursos bajos de sus afluentes.* Bakeaz y Fundación Nueva Cultura del Agua, Bilbao.
- Ollero, A. (2010). Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology,* 117, 247-260.
- Ollero, A. (2011). Restauración fluvial: principios, dificultades y propuestas. La perspectiva del CIREF. *I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial,* 36-45, MARM, CHD y CIREF, León.
- Ollero, A. (2014). *Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores.* Contrato de río del Matarraña y ECODES, Zaragoza.
- Ollero, A. (2015). Un necesario cambio de visión y de estrategia en la gestión de las inundaciones. *Tecnoaqua,* 12, 122-124.
- Ollero, A. (2017). *Hidrogeomorfología y geodiversidad: el patrimonio fluvial.* Centro de Documentación del Agua y del Medio Ambiente, Zaragoza.
- Ollero, A. (2019). Un caso a debate: sección de desagüe, alteración de la geomorfología en cauces aluviales y restauración fluvial. *Actas del III Congreso Ibérico de Restauración Fluvial Restaurarios 2019,* 488-496, CIREF y CH Segura, Murcia.
- Ollero, A., Ibisate, A. (2012). Space for the river: a flood management tool. In Wong, T.S.W. (Ed.) *Flood risk and flood management,* 199-218, Nova Pub., Hauppauge.
- Ollero, A., Ibisate, A., Granado, D., Real de Asua, R. (2015). Channel responses to global change and local impacts: perspectives and tools for floodplain management (Ebro River and tributaries, NE

Spain). En: P.F. Hudson y H. Middelkoop (Eds.), Geomorphic approaches to integrated floodplain management of lowland fluvial systems in North America and Europe, 27-52. Springer, New York.
- Ollero, A., Ibisate, A., Acín, V., Ballarín, D., Granado, D., Horacio, J., Mora, D., Nadal, E., Sánchez Fabre, M., Sebastián, M., Segura, F., Valls, A. (2017). Dynamique fluviale, changement global et pression anthropique dans le bassin, le cours et le delta de l'Èbre. *Sud-Ouest Européen,* 44, 41-54.
- Ollero, A., García, J.H., Ibisate, A., Sánchez Fabre, M. (2020). Updated knowledge on floods and risk management in the Middle Ebro River: the "Anthropocene" context and river resilience. *Cuadernos de Investigación Geográfica* (in press).
- Perles, M.J., Olcina, J., Mérida, M. (2018). Balance de las políticas de gestión del riesgo de inundaciones en España: de las acciones estructurales a la ordenación territorial. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales,* 197, 417-438.
- Piégay, H., Barge, O., Bravard, J.P., Landon, N., Peiry, J.L. (1996). Comment delimiter l'espace de liberté des rivières. *Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 24émes Journées de l'Hydraulique: l'eau, l'homme et la nature,* 275-284, Paris.
- Ruiz Villanueva, V., Díez Herrero, A., García, J.A., Ollero, A., Piégay, H., Stoffel, M. (2018). Does the public's negative perception towards wood in rivers relate to recent impact of flooding experiencing? *Science of the Total Environment,* 635, 294-307.
- Sánchez Fabre, M., Ollero, A., Moreno, M.L., Losada, J.A., Sánchez Puertas, J.R., Serrano Notivoli, R. (2017). Évolution hydrologique et inondations récentes dans l'Èbre moyen. *Sud-Ouest Européen,* 44, 97-116.
- Strosser, P., Delacámara, G., Hanus, A., Williams, H., Jaritt, N. (2014). *A guide to support the selection, design and implementation of Natural Water Retention Measures in Europe.* European Commission.
- Ureña, J.M., Ollero, A. (2000). Criterios y propuestas para la ordenación de áreas fluviales. *Ciudad y territorio, Estudios Territoriales,* XXXII(126), 689-710.
- Valette, P., Ollero, A., Girou, A., Cornuau, P., Sivelle, R., Peño, G., Pueyo, A., Sebastián, M. (2019). Les paysages fluviaux urbains de Toulouse et Saragosse: approche géohistorique et analyse comparée de leur perception. *III Jornadas hispano-francesas de Geografía,* Asociación Española de Geografía, Sevilla.
- Van Wesenbeeck, B.K., Ijff, S., Jongman, B., Balog, S., Kaupa, S., Bosche, L., Lange, G.M., Holm-Nielsen, N., Nieboer, H., Taishi, Y., Kurukulasuriya, P., Meliane, I. (2017). *Medidas de protección contra inundaciones basadas en la naturaleza. Principios y orientaciones para la implementación.* Deltares y Banco Mundial, Washington.
- Vinet, F. (2010). *Le risque inondation. Diagnostic et gestion.* Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- Vis, M., Klijn, F., Buuren, M. van (ed., 2001) *Living with floods. Resilience strategies for flood risk management and multiple land use in the lower Rhine River basin.* The Netherlands Centre for River Studies, Delft.
- Waylen, K.A., Holstead, K.L., Colley, K., Hopkins, J. (2018). Challenges to enabling and implementing Natural Flood Management in Scotland. *Journal of Flood Risk Management,* 11: 1078-1089.
- Wohl, E. (2005). Compromised rivers: understanding historical human impacts on rivers in the context of restoration. *Ecology and Society,* 10(2): 2. http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss2/art2/
- Woodward, M., Kapelan, Z., Gouldby, B. (2014). Adaptive flood risk management under climate change uncertainty using real options and optimization. *Risk Analysis,* 34(1): 75-

EXPERIENCIAS Y PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA URBANA FRENTE A INUNDACIONES

Mª Elena García de Consuegra Priego
Hidraqua, Gestión Integral de aguas de Levante, Grupo Suez España
mconsuegra@hidraqua.es

RESUMEN

La resiliencia es la capacidad de individuos, comunidades, instituciones, empresas y sistemas para sobrevivir, adaptarse y evolucionar sin importar qué tipos de estrés crónico y de crisis agudas experimenten. Todo municipio y organización debe de establecer su plan de emergencia ante cualquier situación adversa que se presente como un incendio, ataque terrorista, sequía, terremoto o inundación. Identificar los riesgos y definir la estructura y operatividad de los recursos frente a la emergencia. La Resiliencia urbana es la capacidad de un municipio para prevenir y responder cualquier desastre manteniendo un razonable nivel de funcionalidad. Hidraqua como concesionaria de servicios medioambientales y del ciclo integral del agua, dentro del grupo Suez apuesta por la resiliencia en las ciudades para adaptarse a las situaciones adversas y construir ciudades sostenibles y de futuro como estrategia ante el cambio climático. Trabajamos para la sostenibilidad de los recursos con mejora continua de los procesos operativos de gestión y mantenimiento de la infraestructuras y modernización del ciclo integral del agua. Las ciudades deben de establecer un plan de resiliencia. Actualmente se está colaborando con los municipios para realizar los planes y mecanismos para coordinar los sistemas municipales y participando en el centro de emergencias de las localidades. Basándonos en la experiencia de gestionar el ciclo integral del agua en episodios de inundación como en la DANA de septiembre de 2019 que afectó a 19 municipios del sur de la provincia de Alicante se realiza un análisis de gestión en este capítulo y propuestas de mejora para situaciones semejantes que aumentarán con el cambio climático.

1. ANÁLISIS DE LA GESTIÓN EN LA INUNDACIÓN POR DANA 2019

En septiembre de 2019 se vivió un episodio de lluvia sin precedentes en los últimos 100 años en la región de la Vega Baja de la provincia de Alicante, una DANA, depresión aislada a niveles altos, superando los 400l/m^3 detectado en el SAIH del Segura en el municipio de Orihuela.

El agua y el saneamiento es un servicio básico que debemos de garantizar ante un desastre natural o humano. La falta de abastecimiento de agua potable durante días en varios municipios de la Vega Baja y la falta de drenaje de los viales por la saturación de las redes municipales principalmente redes unitarias llevó al colapso varios puntos de la comarca.



Figura 1. DANA septiembre 2019 Alicante Sur.

Hidraqua gestiona el servicio de agua y alcantarillado de 19 municipios afectados por la DANA de 2019 en Alicante Sur, reparación de 5 tomas principales de abastecimiento, reposición de 3.800Km de tubería, montaje de 25 redes de abastecimiento provisionales, 12 camiones de saneamiento operando simultáneamente, suministro provisional de agua potable mediante cubas, 950 registros repuestos, 50 imbornales, reparación el sistema de drenaje por vacío en Santa Pola.

Ante la previsión de alerta roja establecida, siendo la primera vez en la comarca, se articuló los procedimientos internos ante la crisis.

- Los recursos humanos y materiales, vehículos y maquinaría se reubicaron en los distintos almacenes de la zona para cubrir la mayor extensión frente a un aislamiento de las zonas por inundación como en efecto se produjo posteriormente.
- Los mandos intermedios y directivos se desplegaron en toda la zona para mayor presencia y coordinación con los centros de emergencias establecidos en cada Ayuntamiento.
- Se informaba y actualizaba continuamente la previsión de lluvia y alertas (FloodAlert).
- Se estableció el comité de crisis operacional para reportar las incidencias y coordinar las necesidades de materiales y recursos para desplazarlas desde otras zonas no afectadas: Alicante, Benidorm, Elda, Elche, Crevillente, Villajoyosa.
- Se activo la contratación de contratas y proveedores extras para el refuerzo de recursos.
- Se gestionó de manera centralizadas todas las operaciones desde Dinapsis, Centro Tecnológico y de Innovación de Hidraqua. Se coordinó a las brigadas y materiales para llegar a las incidencias, las órdenes de trabajo para solucionar los avisos de corte de agua, de zonas inundadas por el colapso de redes de alcantarillado, obras de reposición de tubería arrastrada por la fuerza de la bajada de ramblas, puesta en marcha de instalaciones sin suministro eléctrico o inundadas, reparación de numerosas roturas en la red de agua y alcantarillado utilizando aplicaciones tecnológicas

2. PLANIFICACIÓN CENTRALIZADA DE LOS TRABAJOS (DINAPSIS)

La eficiencia en la gestión de la inundación se basó en la centralización de los trabajos; a continuación, se presenta el sistema de planificación.

2.1. Motivación orientada a los ODS

Las empresas del grupo Suez asumen la innovación como un elemento clave para la mejora del servicio. Así mismo, asumen un rol ejemplar de liderazgo con respecto a la innovación urbana y la sostenibilidad de las ciudades, poniendo a disposición del territorio las soluciones avanzadas desarrolladas en el Laboratorio de su Centro Tecnológico y de Innovación denominado "Dinapsis Operation & Lab" (DINAPSIS), primer centro de innovación nacional vinculado a la Gestión Sostenible del Agua y el Territorio, diseñado para operar, desarrollar y mostrar las soluciones más avanzadas en esta materia.



Los procesos principales que generan tareas a realizar en campo son los trabajos comerciales, las averías y los mantenimientos preventivos sobre las instalaciones y los activos principales que componen las redes de distribución y saneamiento.



Así, se ha puesto de manifiesto la necesidad de disponer de tecnologías que permitan monitorizar y gestionar en remoto, así como de nuevos perfiles con la capacitación necesaria.



El servicio de planificación de trabajos incorpora un nuevo perfil operativo: el planificador; un rol con nuevas capacidades para implementar y gestionar soluciones tecnológicas avanzadas que permiten planificar y gestionar los trabajos en campo en tiempo real con toda la información necesaria para hacer frente a las situaciones:





- **Emergencia climática** como la DANA que tuvo lugar en todo el levante
- **La crisis sanitaria del Covid-19** dando soporte en el plan de contingencia de la línea 24h de atención comercial (pago de facturas, consultas sobre contratos..) y operativa (faltas de agua, averías…).



- Recepción de las llamadas de los propios abonados.
- Organización de los equipos para actuar donde es necesario con el menor tiempo de respuesta posible.



Por otro lado, la planificación centralizada ha colaborado en la definición de las actuaciones que se comprenden dentro de los servicios mínimos, coordinando diariamente a los equipos de campo para realizar los trabajos de la forma más eficiente y rentable. De este modo, el Hub Operativo también ha hecho de nexo de comunicación entre distintos departamentos tales como clientes y operaciones para trasladar la información respectiva a los trabajos que son aptos para su ejecución durante la crisis.

El modelo propuesto es el que se representa en el siguiente esquema:

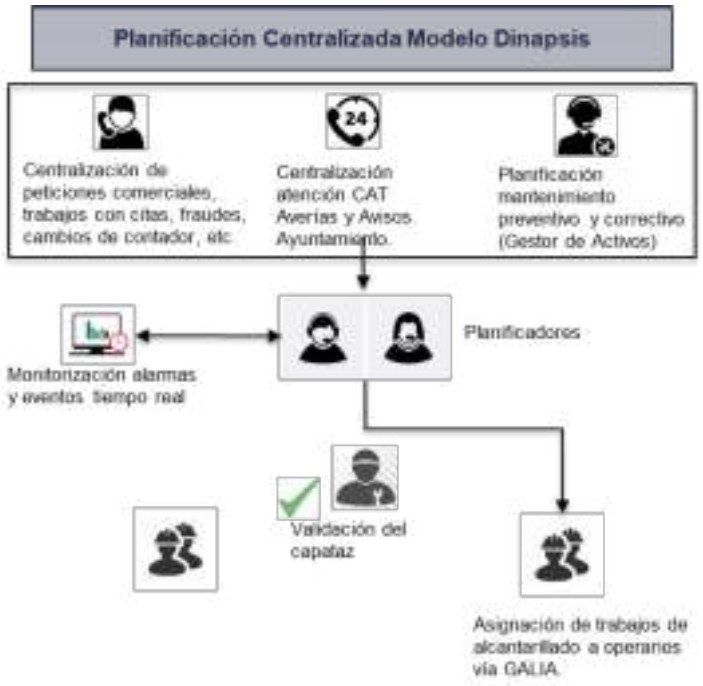


Figura 2. Modelo operativo-Planificación Centralizada.

2.2. Propuesta de valor. Innovación

Las empresas del grupo Suez asumen la innovación como un elemento clave para la mejora su servicio. Así mismo, asumen un rol ejemplar de liderazgo con respecto a la innovación urbana y la sostenibilidad de las ciudades, poniendo a disposición del territorio las soluciones avanzadas desarrolladas en el Laboratorio de su Centro Tecnológico y de Innovación denominado "Dinapsis Operation & Lab" (DINAPSIS), primer centro de innovación nacional vinculado a la Gestión Sostenible del Agua y el Territorio, diseñado para operar, desarrollar y mostrar las soluciones más avanzadas en esta materia.



Figura 3. Espacios físicos Dinapsis Operation & Lab.

Como centro operativo, DINAPSIS cuenta con herramientas tecnológicas y soluciones avanzadas para atender las principales necesidades del Municipio dentro del Ciclo Integral del Agua tales como el Control en Tiempo Real de los Procesos, Gestión del Mantenimiento y conservación de los Activos, el Control de la Calidad del Agua, la Gestión de la Telelectura, el Gobierno del Dato y la Gestión de la Fuerza de Trabajo a través de la Planificación Centralizada, así como la Gestión y Planificación de Inversiones.



Figura 4. Planificador-Hub de Operaciones

Desde el Hub de Operaciones de DINAPSIS, se presta soporte operativo desde las 6:30 a 20:30 horas 5 días a la semana, a través de la figura del Planificador. Así mismo, mediante la figura del Gestor de Activos se dará soporte a la coordinación y planificación de la Renovación de Activos planificada.

- El modelo DINAPSIS incluye la implantación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de las redes de abastecimiento y alcantarillado mediante GISAGUA. En el SIG se detallan todos los elementos que componen las redes con el detalle, precisión y datos necesarios para su exacto conocimiento.
- El servicio de gestión de la información referente a servicios afectados se prestará mediante la plataforma e-WISE y la Integración del SIG con la plataforma de Gestión Comercial (AquaCIS CF) se realiza mediante las herramientas WICOT y GIACO.



Figura 5. Modelo operativo- Sistema de Información Geográfica.

- Para eficienciar la logística interna en cuanto a gestión de Stocks, recorridos y la gestión de órdenes de trabajo HIDRAQUA implanta AquaCIS GT-GOT, Work&Truck (W&T), GID MOBILITY y SIRALC para gestión de órdenes de trabajo y mantenimientos en campo y la imputación de tiempos y materiales asociados.
- AquaCIS GT-GOT es un sistema de gestión de órdenes de trabajo que permite la gestión uniforme de las órdenes de trabajo que surgen de diferentes sistemas origen (comerciales, técnicos, averías) o generados en el propio sistema.
- Work&Truck (W&T) es un sistema de geolocalización para vehículos que permite, además de mejorar en la distribución de trabajos y atención temprana de avisos, realizar una gestión inteligente de nuestra flota de vehículos mediante estudio del mejor itinerario.
- Para la gestión de los depósitos de los almacenes de materiales se utilizará la herramienta implantada el GID MOBILITY y SIRALC, que permite a los usuarios registrar consumos y devoluciones a través de terminales móviles (TPLs) que leen los códigos de barras asociados a los activos existentes en stock y gestionar reclamaciones al proveedor.

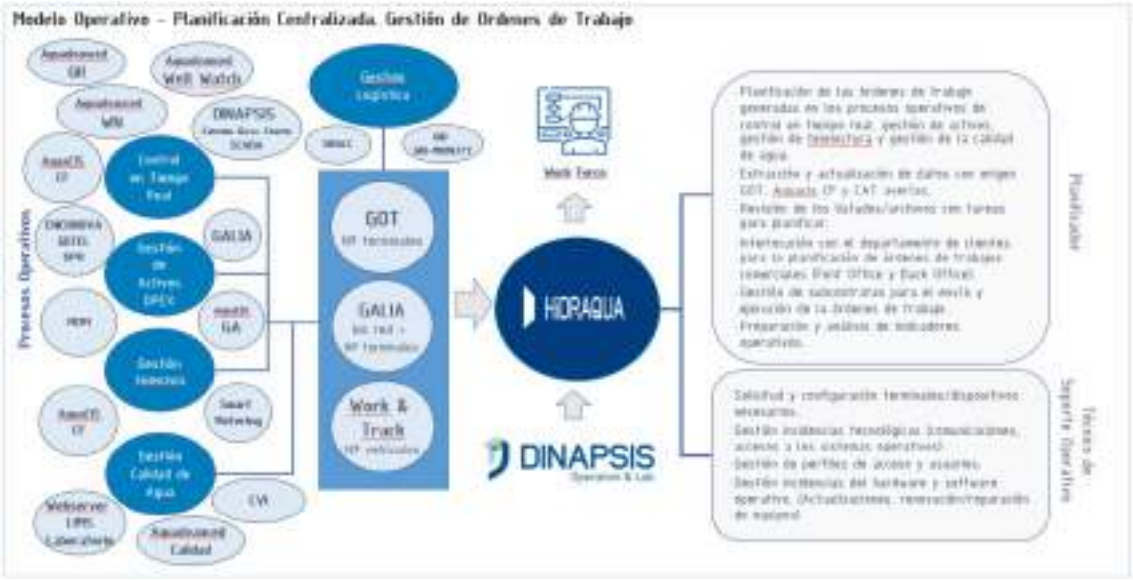


Figura 6. Modelo operativo- Planificación Centralizada-Gestión de OT.

- DINAPSIS implementa un servicio de Telelectura, DINAPSIS Smart Metering, que permitirá tener un mayor control de los consumos, beneficiando tanto a la gestión del servicio como a los abonados. La telelectura permite realizar las operaciones de lectura de forma más eficiente (tiempo, rutas, errores, …), optimizar la gestión de la red y buscar la eficiencia en las operaciones (fraudes, dimensionamiento contadores, balances hidráulicos, averías, etc, proporcionar al cliente cada vez más datos, información, servicios y mejorando su atención (facturación, información on-line, fugas, etc) e impulsar la imagen de municipio inteligente y sostenible.

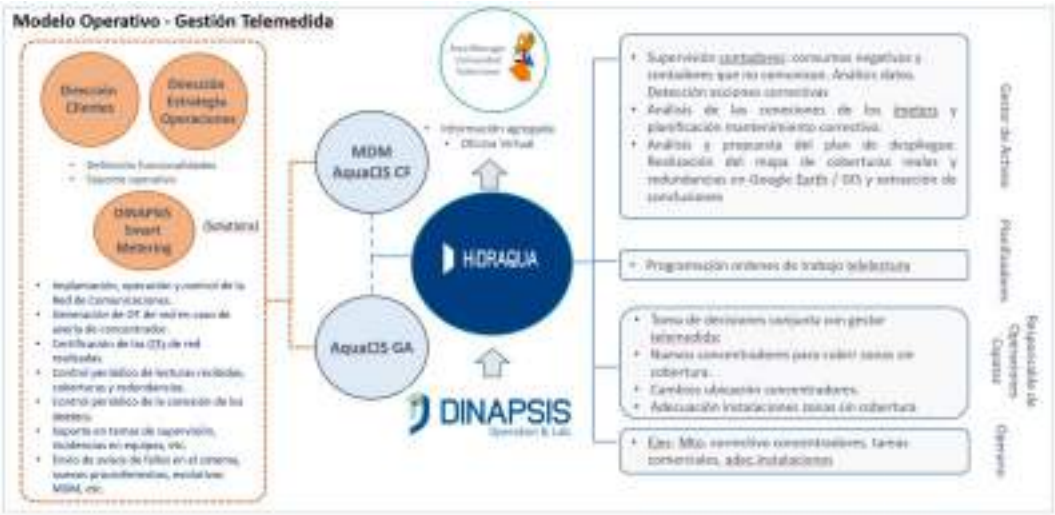


Figura 7. Modelo operativo- Planificación Centralizada- Gestión Telemedida

2.3. Ventajas del modelo de planificación centralizada

Las empresas del grupo Suez asumen la innovación como un elemento clave para la mejora su servicio. Así mismo, asumen un rol ejemplar de liderazgo con respecto a la innovación urbana y la sostenibilidad de las ciudades, poniendo a disposición del territorio las soluciones avanzadas desarrolladas en el Laboratorio de su Centro Tecnológico y de Innovación denominado "Dinapsis Operation & Lab" (DINAPSIS), primer centro de innovación nacional vinculado a la Gestión Sostenible del Agua y el Territorio, diseñado para operar, desarrollar y mostrar las soluciones más avanzadas en esta materia.

2.3.1. Profesionalización de la función de gestión de órdenes de trabajo en terreno:

- Visión centralizada de todas las operaciones a planificar en una zona, seguimiento intensivo del cumplimiento de las fechas comprometidas y mejora de la priorización.
- Trazabilidad centralizada del estado de las operaciones.
- Industrialización del proceso de planificación de operaciones.
- Monitorización de las alarmas del tiempo real y de los eventos de la red de distribución.

2.3.2. Liberación de tiempo del capataz para que pueda incrementar el seguimiento de la calidad de los trabajos ejecutados en campo:

- Planificación y asignación de los trabajos de manera centralizada.
- Atención centralizada de los avisos del Ayuntamiento (reducción en los tiempos de respuesta).

2.3.3. Eficiencia en la planificación y ejecución de trabajos:

- Aumento de la productividad: mayor número de órdenes de trabajo ejecutadas por trabajador.
- Reducción de tareas no ejecutadas: programación de trabajos con cita previa, visión mensual y semanal.
- Reducción de km/por tarea: optimización de las rutas de trabajo.
- Mayor cumplimiento de los planes de mantenimiento preventivo: reducción de riesgos operativos.

3. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS. FLOODALERT

Los sistemas de información, predicción y alerta ante eventos hidrometeorológicos extremos, la

información en tiempo real de la previsión de lluvia y su impacto en terrenos modelizados permite la gestión preventiva de eventos extremos.

FLOODALERT (Early Warning System for floods in urban areas), es un conjunto de servicios modulares de supervisión y alerta en tiempo real sobre condiciones meteorológicas actuales y/o futuras en regiones determinadas. Dicha información de predicción puede ser usada para generar alertas SMS, correos electrónicos o envío automático de ficheros, que permitan notificar alertas, pudiendo de este modo tomar decisiones preventivas.

Las funciones más destacables de FloodAlert son:

- La predicción en tiempo real de precipitación a dos horas vista en zonas concretas, utilizando para ello un motor de cálculo meteorológico único a nivel mundial.
- El cálculo y diseminación de alertas de inundación en zonas urbanas basadas en la superación de umbrales de lluvia acumulada prevista.

A su vez, FloodAlert se complementa con módulos basados en predicción de condiciones meteorológicas a 6 días vista para la configuración de estados de pre-alerta, un módulo integrando los avisos de la AEMET, módulos para la consulta de datos pasados y módulos de configuración.

La representación de la información se realiza gráficamente en plataforma Web (siendo accesible desde cualquier dispositivo conectado a internet), permitiendo animar predicciones y tener una visión de la evolución de las condiciones meteorológicas.

Los módulos de FloodAlert se basan tanto en modelos matemáticos propietarios exclusivos a nivel mundial, como en información adquirida mediante organismos medioambientales líderes en el sector, los cuales permiten:

- Alertar sobre episodios de tormenta.
- Ayudar en la gestión de recursos dependiendo de la previsión de precipitación.
- Ofrecer información a corto y medio plazo a clientes y usuarios sobre la predicción de las condiciones meteorológicas.
- Es útil para actividades al aire libre (deporte, agricultura, pesca, etc.)
- Facilitar la accesibilidad a la información:
    - plataforma Web.
    - alta calidad visual y diseño amigable.
    - alarmas SMS, correo electrónico, etc.

3.1. Módulo Tiempo Real, previsión a corto plazo y rayos

Este módulo contiene el visor de la lluvia observada por el radar en las dos últimas horas y la previsión para las dos próximas horas. Lleva asociada una alarma de lluvia para un punto predeterminado, con indicación de la intensidad en base a una escala cromática. Dicha alarma puede generar mensajes SMS o correo electrónico a una lista de usuarios definidos mediante perfiles configurables.

El módulo también proporciona información sobre los rayos registrados en las dos últimas horas, activando avisos y alarmas (en pantalla, SMS y/o correo electrónico) con áreas de seguridad alrededor del punto de medida configurables (máximo 30 km).

Toda la información se visualiza de forma georeferenciada sobre mapas, permitiendo mostrar información suplementaria bajo distintos niveles de zoom.

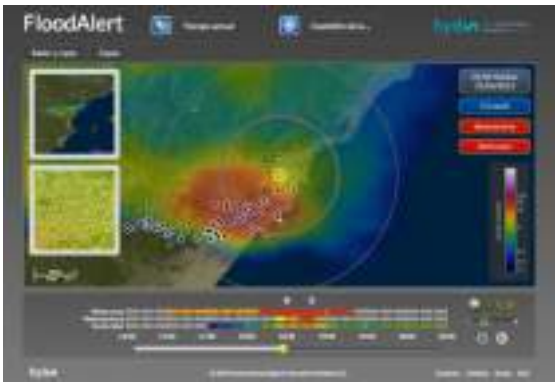


Figura 8. Ejemplo de pantalla en tiempo real.

3.2. Módulo de lluvia acumulada a corto plazo

El módulo de previsión de lluvia acumulada a corto plazo consta de dos partes:

- Una primera parte donde se visualizan las zonas donde está previsto que se superen los umbrales de lluvia acumulada en 30 minutos definidos por el usuario en la próxima hora o dos horas.



Figura 9. Ejemplo de pantalla, Los tres colores corresponden a los tres umbrales definidos, y los puntos muestran el nivel de alerta previsto.

- Una segunda parte donde se visualiza la evolución de la acumulación en 30 minutos, tanto para lluvia observada como prevista en las próximas 2 horas.

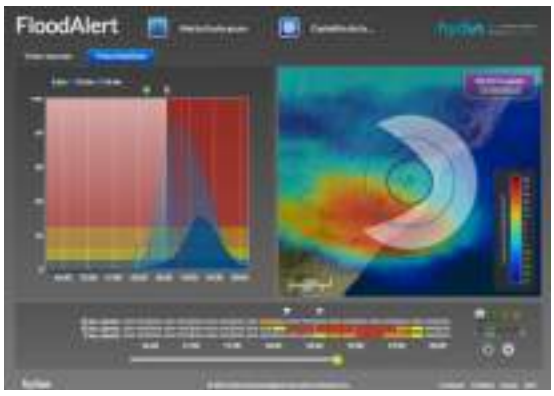


Figura 10. Ejemplo de pantalla, Ejemplo de la pantalla del FloodAlert mostrando la evolución de la acumulación de precipitación en 30 minutos.

Sobre los valores de acumulación se pueden configurar umbrales de alerta, de manera que se recibe información sobre las alertas de previsión de superación, tanto en la pantalla como mediante SMS o correo electrónico.

3.3. Módulo de previsión semanal

Previsión semanal de hasta 6 días vista, altamente regionalizada (con una resolución de modelo de 12 km), sobre condiciones meteorológicas tales como previsión de temperatura máxima y mínima, humedad, nubosidad, viento en superficie, precipitación, etc. todos ellos con una periodicidad de 1 hora, actualizando dicha predicción dos veces al día.



Figura 11. Ejemplo de previsión semanal.

Las predicciones de lluvia, temperatura, nubosidad y viento en superficie son representadas en gráficos generales, pudiendo ver en detalle la situación de dichos parámetros en mapas indicativos.

3.4. Previsión semanal de precipitación

Entre las variables de previsión en base a modelos numéricos cabe destacar las de precipitación, que pueden servir para definir estados de “pre-alerta” con anterioridad a los eventos de precipitación intensos. Entre estas variables, FloodAlert ofrece la previsión a 6 días vista, hora a hora de la acumulación de precipitación, y también integraciones en 6h, 12h y 24h. Y proporciona información de:

- La lluvia máxima en un entorno del punto: Permite tener información y alertas, no solo de lo que se predice en el punto concreto sino también de la previsión en un entorno de ~50 km.
- Probabilidad de lluvia acumulada superior a 1 mm, 5 mm, 10 mm y 30 mm. Permitiendo configurar alertas en base a probabilidad de superación de umbrales.

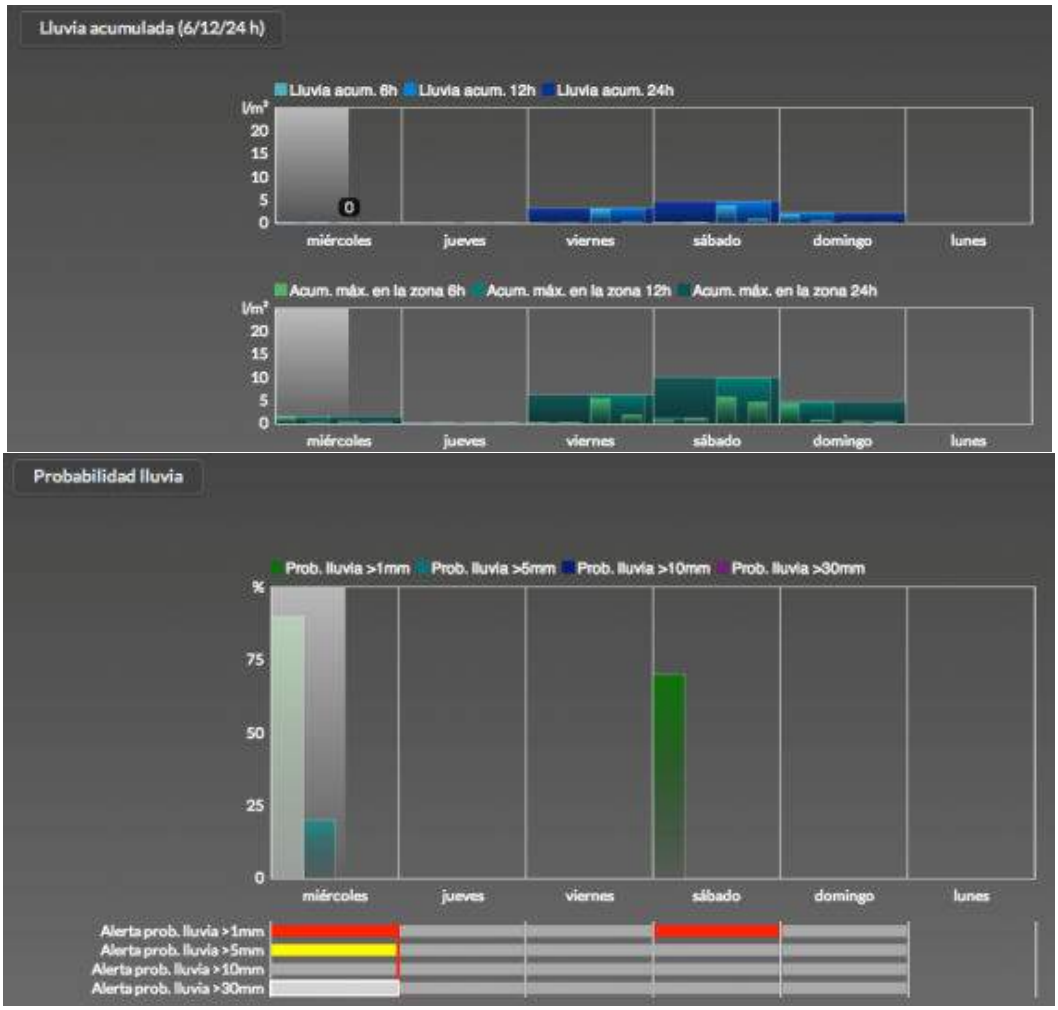


Figura 12. Ejemplo de la precipitación de lluvia acumulada en intervalos de 6, 12 y 24h y de la probabilidad a distintos umbrales (1, 5, 10 y 30mm).

3.5. Módulos de avisos de la AEMET

Este módulo integra los avisos emitidos por la AEMET para la región donde pertenece el punto (según la definición de regiones de la AEMET para los avisos) a resolución horaria, para los próximos 3 días.

Los avisos se visualizan en formato gráfico en la aplicación mediante los tres niveles ya definidos por la AEMET. También se pueden generar alertas en función del nivel definido por el usuario, enviándolas mediante SMS o correo electrónico.

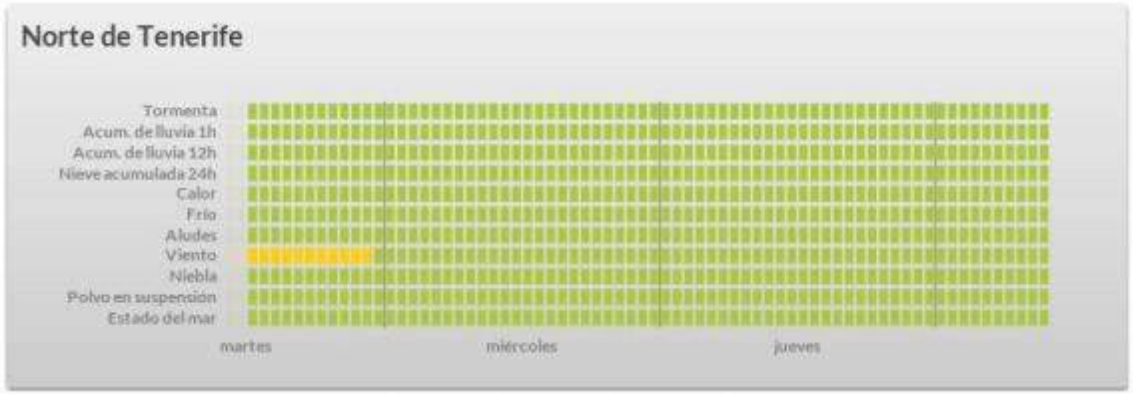


Figura 13. Ejemplo de aviso de alertas enviado por email.

4. SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Los SUDS son Sistemas Urbanos de Drenaje en zona inundables integradas de manera Sostenible. Es más fácil planificarlas en zonas de nueva urbanización pero tenemos varios ejemplos en la provincia que han sido soluciones más económicas que los sistemas de drenaje convencionales.



Figura 14. Drenaje convencional vs SUDS.

Hay que prevenir y gestionar desde la fuente (retener, filtrar, infiltrar desde el origen, evapotranspiración) imitando condiciones originales/naturales.

Los SUDS es una estrategia de adaptación al cambio climático:

- Resiliencia frente a inundaciones, introducen soluciones basadas en la naturaleza que reduzcan y laminan los caudales, dejando espacios en los sistemas actuales para posibles incrementos en la intensidad de las precipitaciones
- Resiliencia frente a sequía, fomentando la infiltración del agua en origen y contribuyendo a recargar los acuíferos, aliviando el estrés hídrico y reduciendo la necesidad del uso del agua potable

- Reducción del efecto isla de calor, aumentado el verde en la trama urbana y construyendo cubiertas vegetadas.
- Disminución de la demanda energética de los edificios, reduciendo la temperatura del interior y aportando sombra a las fachadas.
- Reducción del consumo energético en la gestión del agua urbana, reduciendo la cantidad de escorrentía que entra en la red de saneamiento donde tenemos bombeos y procesos de depuración.

A continuación, se expone algunas soluciones realizadas por Hidraqua y el grupo Suez en la provincia de Alicante:

- Parque inundable La Marjal en Alicante: solución a inundaciones continuas en zona deprimida que producía cortes de viales. El parque recibe y almacena el agua de las zonas inundables próximas, capacidad 45.000m^3 posteriormente se evapora o se dirige a la depuradora. El estanque central es de agua regenerada utilizada para el riego del parque, se recupera especies autóctonas de vegetación de ribera y bosques mediterráneos, se construye un hábitat de aves acuáticas. Genera valor para la ciudadanía.



Figura 15. Parque inundable La Marjal (Alicante).

- Proyecto de renovación de instalaciones hidráulicas y anexas del polideportivo municipal para uso de agua regenerada procedente de la EDAR San Fulgencio. Lago inundable para mejora paisajística del entorno y sirve como retención para gestionar las aguas de escorrentía en este espacio conectando su desagüe al alcantarillado.



Figura 16. Zona anexa al polideportivo San Fulgencio (Alicante).

Con zanjas de infiltración utilizando Arlita, material de biorretención para filtrar metales pesados y zona estancial integrando zonas verdes, incluyendo algunos equipamientos del complejo deportivo y circuito de calistenia con pista de Skate.

- Adecuación parque Europa en Daya Nueva, mediante materiales, pozos filtrantes y redes de tuberías se facilita la evacuación del agua de lluvia.



Figura 17. Parque Europa Daya Nueva (Alicante)

5. CIUDADES RESILIENTES

En las ciudades o comarcas vinculadas se debe de contar con un Plan de acción de Resiliencia. Esto conlleva un análisis integral de los servios urbanos y su funcionamiento, la monitorización de las redes de servicios e infraestructuras, modelos de simulación para analizar la afección y protocolos de actuación si un servicio cae ante una crisis. Se debe de instrumentalizar servicios de alerta para conocer la situación a tiempo de real de la situación municipal para gestionar de manera eficiente ante las incidencias. Aporta seguridad al ciudadano al garantizar el correcto funcionamiento de los servicios con recursos alternativos y un ahorro de los recursos públicos al realizar una gestión eficiente.

Suez, a través de Aquatec, lleva a cabo el proyecto RESCCUE sobre innovación en resiliencia urbana para hacer frente al cambio climático. Se centra en analizar efectos en cascada entre servicios urbanos e infraestructuras críticas, de manera muy detallada, a través de modelos y herramientas que integran su funcionamiento. Al mismo tiempo analiza el funcionamiento global de la ciudad con herramientas de tipo holístico.

El proyecto RESCCUE ha sido llevado en tres ciudades: Barcelona, Lisboa y Bristol. Gracias al análisis se pueden generar modelos y herramientas para aplicar este objetivo a diferentes tipos de ciudades con diferentes cambios climáticos para preparar su Plan de Resiliencia.



Figura 18. Proyecto RESCCUE. Barcelona.

5.1. Metodología HAZUR ASSESSMENT

HAZUR es una herramienta y una metodología creados por la empresa Opticits y mejorada en el proyecto Europeo RESCCUE. La metodología HAZUR de análisis de la Resiliencia Urbana consta de diferentes fases bien diferenciadas las cuales se complementan, a nivel de estructuración y presentación de la información, con la plataforma HAZUR de análisis y gestión de la Resiliencia. El binomio formado por la metodología y la plataforma HAZUR asegura un análisis de la Resiliencia Urbana con un fuerte carácter transversal, haciendo partícipes a todos aquellos actores urbanos que influyenen la Resiliencia del sistema urbano objeto de estudio. Asimismo, la introducción y estructuración de la información en la plataforma HAZUR permiten fijar las bases para desarrollar el proceso HAZUR de mejora continua de la Resiliencia, asociado a la siguiente etapa de gestión de la Resiliencia Urbana.



Figura 19. Principales etapas de la metodología HAZUR ASSESSMENT.

5.2. Descripción general del análisis de la Resiliencia

El objetivo de un Estudio Completo de Resiliencia es analizar con enfoque resiliente los servicios e infraestructuras presentes en un municipio, lo cual facilita enormemente la herramienta HAZUR. Para ello, se determinan e identifican los siguientes aspectos del sistema urbano:

- Identificación de los actores urbanos, tanto de la administración pública como de las operadoras que prestan servicios dentro del municipio, a involucrar en el estudio y la futura gestión de la Resiliencia.
- Identificación de los servicios e infraestructuras básicos para el normal funcionamiento del sistema urbano y su priorización desde un punto de vista resiliente.
- Identificación de Responders: aquellos recursos materiales o humanos disponibles en el municipio para mitigar los efectos producidos por los impactos sobre el sistema urbano.
- Mapa de Resiliencia: determinación de las interdependencias entre los servicios e infraestructuras del municipio.
- Redundancias: identificación de las redundancias presentes en las infraestructuras del municipio.
- Detección de impactos y sus consecuencias sobre los servicios e infraestructuras objeto de estudio (Matriz What If).
- Determinación de los efectos cascada producidos por los efectos derivados de impactos de distinta índole.
- Primera aproximación a la determinación de los KPIR: variable o conjunto de variables a monitorizar en referencia a las infraestructuras consideradas más críticas para, en la siguiente etapa de gestión de la Resiliencia, configurar la Oficina de Resiliencia (o Situation Room) del municipio (mediante una futura aplicación del HAZUR MANAGER).
- Identificación y priorización de los Proyectos de Mejora en referencia a la gestión y Resiliencia del sistema.
- Proporcionar el cuadro de mando y el modelo de gestión de la Resiliencia Hazur® System.
- Establecer un Plan de Gestión de la Resiliencia, y la mencionada Sala de Situación.

¿Cómo mejorar y aumentar la Resiliencia de un sistema urbano? ¿Cuál es el proceso que se ha de seguir para implementar con éxito la Resiliencia en un sistema urbano?

- El primer paso indispensable para mejorar la Resiliencia Urbana se refiere a la adopción de sus conceptos y objetivos por parte de todos los actores urbanos que componen un sistema urbano, es decir, la ciudadanía, las operadoras que prestan servicios, los gestores y los líderes

de la ciudad. Es fundamental que los líderes de la ciudad apoyen y sigan el proceso de implantación de la Resiliencia para que esta se desarrolle con éxito.

- El segundo paso que realizar hace referencia al Análisis de la Resiliencia del sistema urbano con el objetivo de determinar el estado resiliente del mismo (Resilience assessment). Se ha de tener en cuenta que un sistema urbano es un sistema de sistemas que está vivo, que evoluciona y se transforma a lo largo del tiempo. En consecuencia, la implementación de la Resiliencia no puede hacer referencia únicamente a un estudio puntual del sistema urbano, sino que se ha de enfocar como un proceso de mejora continua.
- El tercer y último paso para la implementación hace referencia a la Gestión de la Resiliencia. A partir del punto de partida anterior, se puede comenzar con el proceso de mejora continua de la Resiliencia: una vez se conoce cómo funciona la ciudad y se dispone de la información clave desde un punto de vista resiliente, los líderes de la ciudad o los responsables de la Resiliencia podrán empezar los trabajos necesarios para gestionar adecuadamente la Resiliencia del municipio. Para dicha gestión deberá crearse el Centro de Gestión de Resiliencia del Municipio y elaborar el Plan de Acción de la Resiliencia, especificando las tareas y acciones a realizar.

Se exponen a continuación los principales puntos que ha de contener un Plan de Acción de Resiliencia (a veces también denominado Plan de Gestión de la Resiliencia):

- Validación de la información del Estudio inicial de Resiliencia.
- Complementar la información relevante, respecto el estudio inicial, desde un punto de vista resiliente.
- Determinar los procedimientos internos de mejora continua de adquisición de información. Identificar y adecuar el sistema de gestión de la Resiliencia.
- Análisis y priorización de ejecución de los Proyectos de Mejora identificados. Definir y hacer viables los planes y proyectos de mejora identificados, su implantación, y la operación de las medidas que lo requieran.
- Planificación de los talleres de Resiliencia (donde se establezcan las acciones a realizar, como conjunto, frente a Impactos determinados).
    - Definir los procedimientos de comunicación entre los diferentes actores urbanos.
    - Definir protocolos de colaboración transversal entre servicios.
    - Asignar responsabilidades y competencias de los responsables de Resiliencia.
    - Planificar las tareas a realizar y hacer su seguimiento.
- Implantación de los sistemas de control del estado Resiliente de la ciudad (Sala de Situación, monitorización de variables clave del estado Resiliente del sistema).

Respecto al Centro de Gestión de la Resiliencia (también llamado Oficina de Resiliencia o Situation Room), se trata de un sitio virtual (si se quiere físicamente asociado a un potencial Centro de Control de Emergencias), desde donde el responsable de gestionar la resiliencia de la ciudad y su equipo velarán por el buen funcionamiento de los sistemas, monitorizando los procesos clave para la resiliencia y simulando impactos y respuestas para estar más preparados.

En el caso de Benidorm, se ha identificado la Sala de Crisis existente en el Centro Tecnológico DINAPSIS Operation And Lab, desde donde se ha articulado el proyecto Resiliencia Urbana en el Municipio de Benidorm.

5.3. Diagnóstico de la Resiliencia Urbana en Benidorm

Para el diagnóstico se ha realizado el análisis de los siguientes servicios urbanos y sus infraestructuras asociadas:

- Servicio de suministro de agua
- Servicio de alcantarillado
- Servicio de depuración de aguas
- Servicio de gestión de playas
- Suministro de energía eléctrica
- Suministro de gas natural
- Servicio de hospitales
- Red de centros de atención sanitaria primaria
- Transporte público – autobuses
- Transporte público – trenes
- Mantenimiento de parques y jardines
- Telefonía móvil
- Operadores de internet
- Recogida de RSU
- Tratamiento de RSU
- Limpieza viaria
- Vías urbanas
- Vías interurbanas
- Policía



Una vez identificados los servicios municipales que deben hacer parte de la Diagnosis de Resiliencia y las infraestructuras críticas se pasa al análisis de sus interdependencias a nivel de servicio, y, en muchos casos, por su importancia dentro del municipio o debido a la información disponible del mismo, se ha analizado a nivel de infraestructura. Toda esta información se plasma en la "matriz de interdependencias".



Figura 20. Ejemplo Matriz de Interdependencias Municipio de Benidorm.

La resolución de la matriz de interdependencias permite detectar el grado de carácter donante o receptor de los distintos servicios analizados y, en consecuencia, el grado de disfuncionalidad que provocaría en el sistema urbano la caída de alguno de los citados servicios. Dicho de otro modo, nos permite identificar los servicios críticos del municipio, aquellos que desatarían efectos cascada de más consideración en el sistema urbano.

Esta tabla muestra la clasificación de los servicios analizados en función de su carácter donante.

Dado que el estado de servicios mínimos se define como "una afectación al normal funcionamiento del servicio, pero sin llegar a hacerlo caer", con lo que si no llega a caer no va a provocar la caída de otros servicios dependientes. Es decir, aquellos servicios que quedan en estado de servicios mínimos no provocarán efectos cascada.
En consecuencia, la clasificación anterior muestra aquellos servicios que producen más afectaciones sobre otros servicios (servicios mínimos o caídos) pero no necesariamente representa la clasificación de los servicios más críticos, es decir, aquellos que producen los efectos cascada más relevantes.

Classificación de los servicios como donantes	Posición	Puntuación
Electricidad	1	45
Telecomunicaciones	2	38
Vías Urbanas	3	36
Distribución de Combustible	4	35
Semáforos y Alumbrado	5	30
Suministro Agua-Distribución		
Alcantarillado Bombeos EDAR	6	26
Policia Local		
Servicio Autobuses-Líneas		
Alcantarillado Urbano Benidorm	7	25
Bomberos		
Cruz Roja y Transporte Sanitario		
Distribución de Gas		
Limpieza Viaria		
Recogida de Residuos		
Captación y Transporte de Agua	8	24
Depuración		
Salud Pública		
Servicio Autobuses-Paradas		
Suministro Agua-Producción		
Gestión de Playas	9	23
Servicio educativo		
Ciudadano	10	22

Figura 21. Análisis de los servicios más donantes para el caso de Benidorm.

Para clarificar cuáles son realmente los servicios más críticos que se extraen del presente estudio se muestra la siguiente clasificación y consideraciones sobre los mismos, teniendo en cuenta solo las interdependencias que hacen caer a otros servicios.

Classificación de los servicios como donantes críticos	Posición	Puntuación
Electricidad	1	24
Vías Urbanas	2	6
Suministro Agua-Distribución	2	6
Distribución de Combustible	2	6
Captación y Transporte de Agua	3	3
Alcantarillado Bombeos EDAR	3	3
Depuración	3	3
Semáforos y Alumbrado	3	3
Suministro Agua-Producción	3	3

Figura 22. Análisis de los servicios más críticos para el caso de Benidorm.

El servicio de electricidad es claramente el servicio más crítico del sistema. La caída del servicio eléctrico provoca la caída de varios servicios del municipio, como el alcantarillado (urbano y Bombeos EDAR), la recogida de residuos y los servicios de semáforos y alumbrado y suministro de agua, tanto la producción como la distribución, siendo estos últimos tres, a su vez, servicios críticos del municipio.

Utilizando esta misma metodología, pero bajando a nivel infraestructuras, se hizo un análisis para ver qué infraestructuras son las más críticas en cuanto a su carácter de donantes o de receptoras en relación con otras infraestructuras.

Cabe tener en cuenta que, para el presente estudio, se consideran aquellas infraestructuras que desde los propios servicios se han identificado como más relevantes, hecho que no significa que se incluya

un listado exhaustivo de todas las infraestructuras de la ciudad. En este caso, se han generado varias matrices de análisis de interdependencias, algunas de ellas de grandes dimensiones.

Un estudio como el presentado aquí permite analizar de forma holística ciudades complejas como Benidorm, permitiendo así mejorar la capacidad de respuesta ante impactos de todo tipo, y a la vez mejorar en la operación diaria de los servicios urbanos, debido a las sinergias que aparecen en un proceso como este.

Tras la realización de este diagnóstico de la Resiliencia en Benidorm, el siguiente paso consiste en la realización del Plan de Resiliencia Urbana (PRU), y después la implantación de la Oficina de Resiliencia Urbana

El PRU tiene como objetivo determinar los procedimientos internos de mejora continua en la adquisición de la información referente a los servicios e infraestructuras del municipio. La información analizada en el diagnóstico debe ser actualizada y ampliada en el marco de un proceso de mejora continua. Además, el PRU debería contener también un Plan de acción detallado, con las medidas futuras a implementar, y preparar a su vez un plan de seguimiento de este. Para terminar, el propio PRU consta de la creación de las mesas de Resiliencia Urbana, principal instrumento para abordar la reacción del municipio frente a situaciones de crisis, en la operativa diaria y la priorización de las acciones futuras a implementar.
Una vez realizado el Plan de Resiliencia Urbana se dispondrá de todas las herramientas para gestionar la Resiliencia del municipio. Luego, será la Oficina de Resiliencia Urbana la responsable de ejecutar las acciones definidas en el PRU de Benidorm. Esta gestionará transversalmente la resiliencia del municipio de Benidorm, integrada en el centro DINAPSIS de Benidorm, compartiendo datos e interactuando con el resto de los sistemas que lo conformen.

REFERENCIAS

- Amillo Alegre, F. (2014). *Agua potable y saneamiento en Benidorm*. https://histobenidorm.blogspot.com.es/2014/03/agua-potable-y-saneamiento-en-benidorm.html
- Amillo Alegre, F. (2013). *Breve historia de la depuración de las aguas residuales en Benidorm*. https://histobenidorm.blogspot.com.es/2013/03/breve-historia-de-la-depuracion-de-las.html
- CHJ, Confederación Hidrográfica del Júcar (2013b). *Plan director de defensa contra las avenidas en la comarca de la Marina Baja (Alicante)*. CHJ, Confederación Hidrográfica del Jucar, Valencia.
- CHJ, Confederación Hidrográfica del Júcar (2014). *Proyecto de Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.* CHJ, Confederación Hidrográfica del Jucar, Valencia.
- CHJ, Confederación Hidrográfica del Júcar (2015). *Memoria. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*. CHJ, Confederación Hidrográfica del Jucar, Valencia. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/PHC-2015-2021-Plan-Hidrologico-cuenca.aspx
- Generalitat Valenciana (2009). Plan Especial frente al riesgo de Inundaciones. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, Valencia.
- Generalitat Valenciana (2013). *Plan de Acción Territorial del Riesgo de Inundaciones en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)*. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, Valencia. www.citma.gva.es/ca/web/planificacion-territorial-einfraestructura-verde/revision-del-patricova-85207
- Generalitat Valenciana (2013). *Plan Territorial de Emergencia de la Comunidad Valenciana*. Decreto 119/2013 del Consell.

- Entrevista a Pere Malgrat, director drenaje urbano resiliencia Suez Advanced Solutions *Tecnoaqua*.
- FLOODALERT, *Sistema de Alerta Temprana de inundaciones en zonas urbanas*, Aqualogy.
- Grupo SUEZ. Servicios hidrometeorológicos para la alerta y prevención ante inundaciones.
- Hidraqua (2013). *Informe al Ayuntamiento de Benidorm sobre zonas inundables urbanas*.

ESTADO DE RIESGO DE LA VEGA BAJA DEL RÍO SEGURA FRENTE A INUNDACIONES. NECESIDAD DE REALIZAR UN PLAN DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

José Vicente Benadero García-Morato
Dirección General del Agua, Generalitat Valenciana
benadero_jos@gva.es

Pedro Ignacio Muguruza Oxinaga
Dirección General del Agua, Generalitat Valenciana
muguruza_ped@gva.es

Jordi Marín Abdilla
Dirección General del Agua, Generalitat Valenciana
marin_jorabd@gva.es

RESUMEN

La aparición de episodios climáticos adversos, con fuertes intensidades de lluvia, es bien conocida en todo el este y sudeste de la península ibérica. La Confederación Hidrográfica del Segura contabiliza, en su página web, alrededor de 70 avenidas en la región de la Vega Baja durante los últimos 100 años, que han provocado numerosas víctimas mortales. Con el objetivo de paliar y prevenir los daños ocasionados por estas inundaciones se han venido realizando numerosas intervenciones. Entre ellas destaca el Plan de Defensa contra Avenidas del río Segura, en la década de 1990, que concluyó con la ejecución de 23 actuaciones. Sin embargo, episodios de lluvia recientes demuestran que dicho plan, si bien aumentó la capacidad del cauce del Segura, resulta insuficiente ante las aportaciones recibidas en el llano de inundación de la Vega Baja. El objeto del presente estudio es exponer la situación de riesgo actual en que se encuentra la comarca frente a fenómenos de lluvias intensas, analizando la morfología, las infraestructuras existentes y sus afecciones, así como los daños producidos en la DANA de septiembre de 2019, para terminar, proponiendo alternativas de soluciones y conclusiones, que sirvan de guía para un futuro plan de defensa contra inundaciones.

1. INTRODUCCIÓN: INUNDACIONES EN LA VEGA BAJA DEL SEGURA, UN PROBLEMA CONOCIDO (¿HISTÓRICO?)

Ya en época romana se describía la desembocadura del río Segura como una bahía marina de escasa profundidad, a la que llamaron "Sinus Ilicitanus", y a la que llegaban los diversos cauces de ríos y ramblas. Como resultado de las variaciones del nivel del mar, de la colmatación por aportaciones de los cursos de agua continentales y de la desecación por drenajes realizados por el hombre se fue rellenando hasta llegar a la situación actual, constituida en un llano de inundación de los mismos cauces.

La evolución paleográfica de la zona puede apreciarse en la siguiente figura. Durante esta transición se fueron marcando canales preferentes de drenaje, que aún hoy constituyen zonas preferentes de escorrentía y acumulación de agua. Se puede observar las entradas del río Segura, del Vinalopó y la rambla de Abanilla.

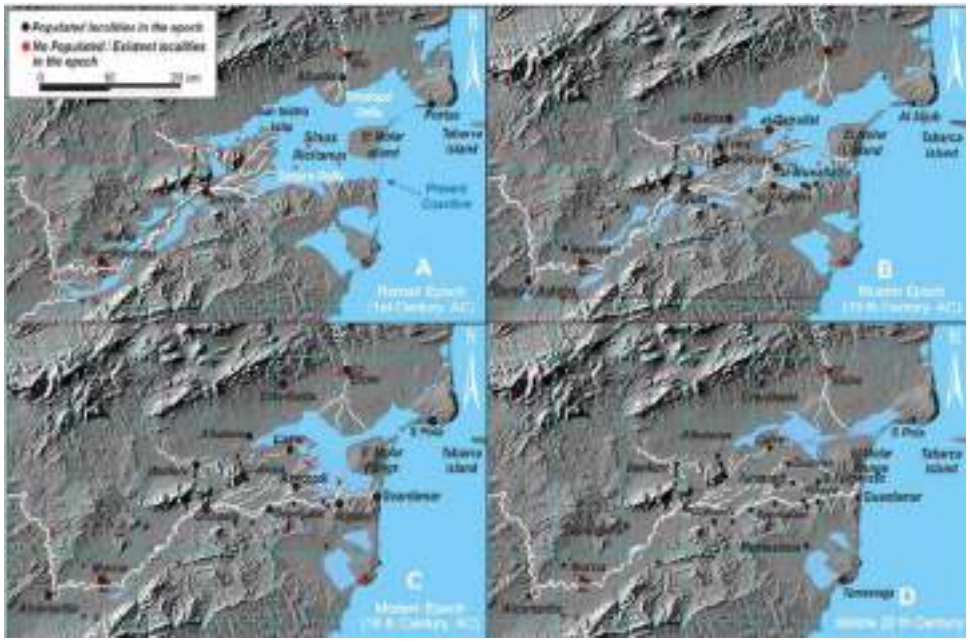


Figura 1. Reconstrucción paleográfica de la depresión del Bajo Segura basada en las propuestas paleográficas de Tent-Manclús (2013), reconstrucciones de los sistemas de acequias y periodos de desecación artificial del antiguo "Sinus Ilicitanus" ibero-romano y descripciones paleográficas de época romana y musulmana realizadas por Pocklington (1989), Azuar Ruiz (1999), Gutierrez Lloret et Al. (1999); Sánchez-Pérez y Alonso (2004) y Parra Villaescusa (2013). Fuente mapa base: Instituto Geográfico del Ejército.

La Confederación Hidrográfica del Segura cuenta en su página web con una amplia cronología de los eventos acaecidos desde el año 1259. Son reseñables, por su magnitud, los eventos de Santa Teresa (15-10-1872, más de 1.000 fallecidos), y más recientemente el 21-4-1946, el 28-9-1947, el 20-10-1948, el 20-10-1973 (90 víctimas), el 19-10-1982 y la riada del 10-11-1987. En la década de 1980 se produjeron 6 avenidas originadas por lluvias intensas en alguno de los afluentes importantes del río Segura.

1.1. El Plan de Defensa contra Avenidas de 1987

Con ocasión de los diferentes episodios de lluvia se fueron realizando intervenciones para paliar y tratar de prevenir los daños de las inundaciones.

Las últimas actuaciones importantes se realizaron en el marco de un Real Decreto-ley (RDL 4/1987 de 13 de noviembre) aprobado a consecuencia de las intensas lluvias de 1987. Al amparo de un Plan de Defensa contra Avenidas del río Segura desarrollado a partir de unos estudios previos realizados en 1977, la Confederación Hidrográfica del Segura llevó a cabo la ejecución de 23 actuaciones (13 presas, encauzamientos desde la Contraparada a Guardamar y algún canal de descarga). Los encauzamientos urbanos en la provincia de Alicante, al ser competencia de la Generalitat Valenciana, los realizó la Conselleria de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes.

El Plan fue diseñado por D. Alfonso Botía Pantoja, director técnico de la CHS. El ingeniero director de las obras de encauzamiento, D. Joaquín Ezcurra Cartagena, explica en un artículo acerca de las obras (Revista de Obras Públicas N.º 3.341 de marzo 1995) la problemática existente y la solución adoptada:

> *La capacidad del cauce del río Segura había quedado reducida, en algunos tramos, a alrededor de 120 m³/s, por lo que un aguacero importante sobre cualquiera de las cuencas receptoras de los afluentes originaba en muy poco tiempo caudales punta que, vertiendo definitivamente al río*

Segura, producían por incapacidad del cauce, desbordamientos que destruían parte de las motas del río e inundaban decenas de miles de Has, arrasando los cultivos bajos y arbolados, afectando a núcleos diseminados y a determinadas poblaciones que quedaban aisladas mientras permanecían las aguas. Al tratarse de zonas bajas de cota no es rápido su desagüe, lo que hace más grave el problema.

...

La problemática planteada para el nuevo encauzamiento era de difícil solución, ya que el río circula por el interior de las poblaciones de Murcia, Orihuela y Rojales, constituyendo puntos de estrangulamiento importantes para el supuesto de acondicionar el cauce de la capacidad necesaria al menos para un periodo de retorno de 50 años, que supone unos 2.000 m³/s.

Por otro lado, el dimensionamiento del río para este caudal implicaría la realización de obras de tal envergadura que afectarían incluso a la ordenación del territorio, debido al gran número de viviendas y servicios de regadío y de comunicaciones afectadas.

...

El río Segura a su paso por la ciudad de Murcia se encontraba con anterioridad encauzado con una capacidad de 600 m3/seg. Se ha comprobado que se puede conseguir una capacidad del cauce para 400 m³/seg a su paso por Orihuela y Rojales, mediante obras de fábrica y regularización de la pendiente de los tramos situados aguas abajo de estas ciudades.

Ha parecido lógico, pues, ejecutar el encauzamiento del río Segura desde la Contraparada hasta Guardamar del Segura para esta capacidad de 400 m3/seg e intentar que no superen este caudal las aportaciones al mismo de sus afluentes en épocas de lluvia.

...

Son trece los nuevos embalses, con una capacidad total de 178 Hm3 que aseguran, bajo el periodo de retorno establecido, que por el cauce del Segura no circularán caudales superiores a los 400 m3/seg.

Puede parecer escasa la garantía del periodo de retorno aludido teniendo en cuenta que un fin primordial de estas obras es defender una población de 700.000 habitantes; pero aumentar el periodo de retorno implica construir embalses de mucha más capacidad y no existe esa posibilidad desde el punto de vista topográfico.

...

El importe de las obras es de 50.000 millones de pesetas, y se ha realizado un estudio económico, respecto a los perjuicios evitados, que permite destacar unos beneficios muy positivos tomando como referencia el año horizonte 2.032

Así pues, el plan se fundamenta en que, dada la imposibilidad de realizar un encauzamiento para un caudal superior al admisible (400 m³/s) en diversas poblaciones, se adopta el criterio de realizar un canal para dicho caudal y presas de laminación en los diversos afluentes del río, para tratar de conseguir que la avenida no supere dicho valor. El coste estimado de las obras en 1995 era de 300 millones de euros. Las obras del Plan de defensas contra avenidas concluyeron en 2001.

1.2. Otros proyectos en la rambla de Abanilla

En los años sesenta se implantó en la rambla de Abanilla, aguas abajo de esta población, un interceptor, del que parte un canal para derivar caudales de avenida hacia el embalse de Santomera. Desconocemos el caudal que es posible derivar, que estimamos en torno a 100 m³/s.

Con posterioridad al plan, la CHS también desarrolló un proyecto para encauzar 170 m³/s desde la parte baja de dicha rambla hasta el río Segura, entroncando a la altura de la Campaneta, aproximadamente, pero no llegó a ejecutarse por la oposición de algunos ayuntamientos. Otra actuación que no llegó a realizarse, también por oposición, fue el "Encauzamiento de las Ramblas de San Cayetano, Amorós y del Hondo y colector hasta la laguna del Hondo".

Tanto el Plan de Defensa de 1987 como otros proyectos posteriores, como los antes citados, algunos de ellos ejecutados parcialmente o imposibilitados por la oposición de diversos grupos afectados,

ponen de manifiesto la necesidad de abordar el problema en su conjunto, no siendo adecuado ejecutar actuaciones de ámbito local que pueden romper un equilibrio hidráulico global muy sensible en el que la mejoría de unas zonas puede ir en detrimento de otras. Es necesario, pues, avanzar y resolverlo coordinadamente.

2. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.1. Geología y geomorfología

La cuenca del Bajo Segura tiene un basamento o sustrato triásico cubierto por una cobertera sedimentaria de edad Mioceno Superior-Cuaternario (en torno a 8-10 millones de años de edad), cuyo espesor varía entre algunos centenares y algo más de dos mil metros. Una de las singularidades de este relleno sedimentario es que a lo largo del actual cauce del río Segura hay una capa superficial de varias decenas de metros de espesor de sedimentos muy poco consolidados, horizontales, y que le confieren a la Vega Baja su topografía tan suave, prácticamente llana.

De este modo la Vega Baja se ubica, parcialmente, sobre el llano de inundación de la desembocadura del río Segura que está limitado:

- Al Norte por las sierras de Abanilla y Crevillente (zona externa de Cordillera Bética).
- Al Oeste por las sierras de Callosa y de Orihuela (zona interna de Cordillera Bética).
- Al Sur por las sierras de Hurchillo, Benejúzar y Guardamar (pliegues activos ligados a la actividad de la Falla del Bajo Segura).

En la zona de transición entre estos relieves y el llano se sitúan superficies de suave pendiente (glacis) relacionadas con abanicos aluviales. En la parte central, fuera de la transición, nos encontramos con zonas de sedimentación marina de espesores superiores a centenares de metros y con pendiente escasa (inferiores al cinco por diez mil), sobre las que se encuentran estratos sedimentarios de origen fluvial.

Como resto de la antigua laguna ha llegado a nuestros días el Hondo de Elche. Entre 1932 y 1945 la Comunidad General de Riegos de Levante construyó, sobre parte de la laguna semidesecada y marjalería que restaban, dos embalses de 5 y 11 hm^3 respectivamente, quedando, alrededor, pequeñas lagunas de agua salobre. El conjunto fue declarado parque natural en 1994. Dentro del mismo llano, justo al norte de los embalses, discurre el tramo final del río Vinalopó, que se encuentra ya bajo la administración de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Sus crecidas no alcanzan la Vega Baja normalmente, al encontrar por medio los embalses y un poco más al este las salinas de Santa Pola, que actúan como cuenco receptor. Sin embargo, una avenida extraordinaria podría alcanzar, en parte, la Vega Baja, dada el escaso desnivel que presenta la llanura. No se ha considerado sus efectos en esta comunicación, ya que no ha tenido influencia en el último evento, pero es una posibilidad que no debemos olvidar.

2.2. Hidrología

Desde el punto de vista de las avenidas, con independencia de las aguas que caen sobre la propia Vega Baja, a esta comarca le llegan aguas de tres distintas procedencias:

- De la Vega Media del Segura (a través del propio río Segura con sus ramblas afluentes Garruchal, Tabala y Santomera, así como de los azarbes de El Reguerón por la derecha y Merancho por la izquierda, entroncando ambos ya en la Vega Baja).
- De la rambla de Abanilla (única rambla importante del Segura que se le incorpora en el llano).
- De las sierras que limitan y definen la propia Vega Baja (Crevillente, Callosa, Orihuela, Escalona, Hurchillo y todas las estribaciones del lado sur).

En las crecidas en la margen izquierda, con independencia de los caudales que pueda aportar por desbordamiento o rotura el río Segura, tienen especial importancia los barrancos y arroyos que nacen

en la sierra de Crevillente y descargan sus aguas en el noroeste de la cuenca, donde destacan los barrancos del Tollo, San Cayetano, del Pollo y Mangranera, el arroyo de la Victoria y las ramblas de Cox, Algüeda, Lima y de Ballester. El punto principal de entrada de aguas en la cuenca baja se produce por el oeste a través de la Rambla de Abanilla, de gran trascendencia por la considerable extensión de su cuenca hidrográfica. Esta rambla aporta, sin control alguno, grandes caudales al llano de inundación, al desaparecer su cauce entre cultivos, tras cruzar la A7. Además, hay que considerar las aportaciones que llegan de la Vega Media por el azarbe del Merancho, que desemboca en el río poco antes de Orihuela, aportando entre otras la escorrentía de la rambla Salada o de Santomera y desembalses de la presa de regulación existente.

La margen izquierda del llano recoge los aportes de la mayor parte de cauces de flujo discontinuo, la rambla de Abanilla y ramblas de la sierra de Crevillente, que se han subdividido en la rambla del azarbe de la Anilla y la rambla del Azarbe de la Rambla. No se consideran las cuencas asociadas a los barrancos del Bosch, Barbasena y de los Arcos que desembocan en el Hondo procedentes de la sierra de Crevillente, al no estar directamente conectados con los azarbes.

La superficie total de la cuenca de aportación a la margen izquierda de la Vega Baja es de 874 km² aproximadamente según la distribución por subcuencas de la tabla siguiente.

Subcuenca	Superficie (km^2)
Rambla de Abanilla	443.69
Azarbe de la Anilla	139.08
Azarbe de la Rambla	135.34
Vega Baja MI	155.12
Total Superficie	873.22

Tabla 1. Superfície de las Cuencas vertientes a la margen izquierda de la Vega Baja. Fuente: Software CAUMAX del Ministerio de Fomento.

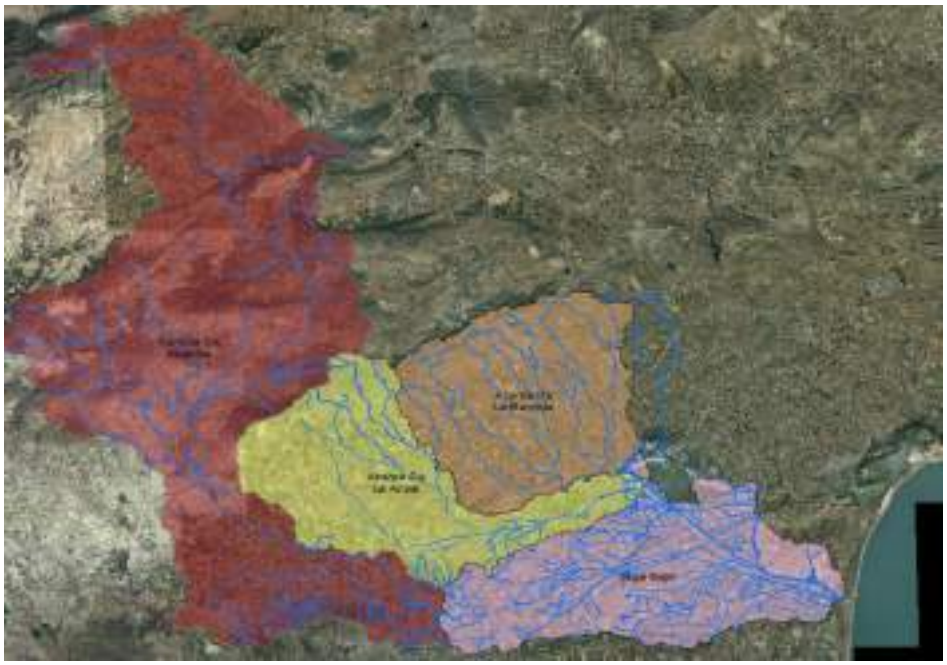


Figura 2. Subcuencas vertientes a la margen izquierda de la Vega Baja. Fuente: elaboración propia.

Respecto a la margen derecha, las afecciones provienen, además de la Vega Media del propio río por su azarbe de El Reguerón, de pequeñas ramblas de los montes que limitan la cuenca por el sur, sierras de Hurchillo y la Pedrera (rambla del Derramador), Benejúzar (Rambla del Estrecho) y del resto de pequeñas elevaciones orográficas hasta Guardamar (rambla de Algorfa y de la Bernarda entre otras), creando efectos locales en las poblaciones de la zona y en época de crecidas, acumulando finalmente sus aguas junto a la mota del río. Este margen no encuentra conexión directa con el mar, debiendo desaguar por el propio río cuando el nivel lo permite.

2.3. Infraestructuras de drenaje actual

2.3.1. Drenaje de la Vega Media y Alta del río Segura

El principal curso fluvial del área en estudio es el río Segura que, dentro del llano, se encuentra muy desplazado hacia el lado sur, aproximadamente el 75% de la Vega se encuentra al lado norte del río y el resto al sur. El río Segura se encuentra encauzado y colgado respecto del llano de inundación, es decir, no permite el drenaje directo de las aguas excedentes de la Vega Baja, salvo tomas y retornos de agua para riego en situación normal. Por el contrario, en episodios de desbordamiento por lluvias o situaciones accidentales, como la rotura de las motas de sus márgenes, puede verter aguas en la llanura por cualquiera de sus márgenes. La sobreelevación de las motas sobre la llanura deriva de la necesidad de aumentar la capacidad de desagüe del cauce, sin ampliar en exceso su anchura (mejor aprovechamiento de la superficie agrícola) y para preservar la energía hidráulica en el canal de desagüe, al poder conservar en el llano la cota de lámina del agua en su entrada al mismo. Esto provoca, sin embargo, que el cauce quede aislado de su entorno, no permitiendo que otras aportaciones de agua distintas del río se puedan incorporar para drenar por él en situaciones de emergencia. Las escorrentías de la Vega Media que no se encuentren debidamente canalizadas hasta el río, como consecuencia de su escasa de capacidad, acabarán indefectiblemente en el llano de inundación por medio de azarbes u otras vías.

2.3.2. Drenaje del llano de inundación

Los antiguos canales de drenaje preferentes definidos por el río se fueron convirtiendo por la acción humana a lo largo del tiempo en una red de riego (azarbes y acequias) que satisfacía las demandas de agua para cultivo y su drenaje para evitar anegamientos. Por los mismos, además, se han venido desaguando las aguas de lluvia y aportaciones de cauces que alcanzan el llano. Se trata de una red de drenaje compleja de analizar, con multitud de azarbes y acequias, que inicialmente llevan una dirección suroeste-noreste siguiendo las líneas de máxima pendiente hasta llegar a la parte más baja, en el entorno del Hondo, desde donde se dirigen en dirección este hacia la antigua desembocadura del río Segura. Las pendientes medias son muy bajas, en torno al 3 por mil, lo que condiciona su capacidad de evacuación. Según la CHS estos cauces son de titularidad privada, estando administrados por las Comunidades de riego.

2.3.3. Infraestructuras existentes y su afección en el drenaje

Dada la configuración geomorfológica expuesta, la margen izquierda del río Segura se caracteriza por ser una gran planicie con pendiente suroeste-noreste, aunque prácticamente nula, en la que las diferentes infraestructuras lineales han ejercido una función directora de los flujos. Debe tenerse en cuenta que casi todas las vías de comunicación terrestre están sobreelevadas sobre el medio adyacente, tratando de mantener su funcionalidad en momentos de inundación del territorio.

Teniendo en cuenta esta situación, para determinar con precisión las afecciones de las infraestructuras a los flujos es necesario realizar un estudio hidráulico bidimensional extendido en el tiempo, sobre la base de un vuelo de restitución topográfica con apoyo de topografía de campo para las principales infraestructuras (carreras y canales/azarbes), con condiciones de contorno de entrada a partir de los hidrogramas de la Rambla de Abanilla y barrancos de la Sierra de Crevillente y condición de contorno

de salida en función de la elevación de los puntos de vertido.

Cabe señalar las siguientes infraestructuras que han influido en los flujos de agua durante la crecida de septiembre de 2019:

- Carretera N-332 en tramo próximo a la desembocadura. Discurre en dirección norte-sur, sobreelevada alrededor de un metro sobre los campos adyacentes. Ha actuado como dique frente al flujo, provocando un incremento en los días de inundación sobre el área situada a su oeste. Durante el episodio de crecida el flujo superó la carretera.
- Carretera CV-91, al sur del t.m. de Almoradí, en tramo adyacente a punto de rotura de mota de margen izquierda del río Segura. Discurre en dirección este-oeste y dirigió el flujo de escape de la rotura en sentido este, desviando las aguas hacia Heredades y Formentera del Segura, inundando sus áreas de cultivo. En este caso la AP-7, también contribuyó a dirigir los flujos de la rotura de la mota. (A partir de los datos suministrados por el SAIH de CHS se estima un volumen de agua evacuada por la rotura de 18 hm^3, con un caudal medio de 50 m^3/s).
- Carretera CV-911 y CV-912, al este de San Bartolomé. Según testimonio de los habitantes de esta pedanía de Orihuela la carretera funcionó como un dique remansando las aguas al sur de estas, manteniendo el área mayor tiempo inundada.
- Carreteras CV-860, CV-855, CV-861, en el límite norte del área de estudio, durante los primeros días de crecida actuaron como barreras frente al paso de las aguas en dirección al mar. Estas carreteras están sobreelevadas alrededor de un metro sobre los campos circundantes
- Autovía A-7 en cruce con Rambla de Abanilla. Seguramente la afección fue poca y de algún modo permitió laminar ligeramente el caudal punta de la rambla. El drenaje transversal de la Autovía en el punto indicado tiene gran capacidad de paso.
- Carretera CV-930, en área cercana a desembocadura de la rambla Abanilla en el llano de inundación, pudo contribuir a dirigir los flujos hacia al sur. Aunque cuenta con poderosas obras de drenaje, debido al exagerado caudal punta, pudo desviar aguas.
- Autopista AP-7, entre Almoradí y Catral. Está pendiente de revisión las fotos aéreas de los primeros días del evento para observar su afección al flujo de agua.
- Otras vías de menor entidad, redes de la Diputación, ayuntamientos, regantes, etc.

En conclusión, permear las vías de comunicación en especial CV-860, CV-855, CV-861 y N-332, a falta de un estudio de detalle, contribuirá a disminuir los tiempos de inundación.

Aparte de las vías de comunicación terrestre, existen canalizaciones que sectorizan tramos de huerta independizando las vías de evacuación, un ejemplo claro es el Azarbe de la Reina, junto con la carretera CV-859, que sectoriza el área norte y el área sur de la huerta, obligando al área norte a desaguar hacia el azarbe la Culebrina y el área sur hacia el Azarbe del Señor. El Azarbe de la Reina desagua flujos procedentes de Almoradí.

3. ANÁLISIS DEL EPISODIO DANA 2019

3.1. Datos pluviométricos

Para evaluar la intensidad de las precipitaciones generadas por la DANA se han tomado los datos de los pluviómetros publicados el 21/10/2019 por la CHS en su web (datos directos desde cada estación, sin revisión). No se plasman los resultados de las estaciones de toda la cuenca por su extensión, complejidad y por quedar, en cierta medida, fuera del ámbito de esta comunicación. Pese a que en la figura siguiente se indica que los datos de lluvias son acumulados a lo largo del mes, se debe indicar que se concentran entre el 11 y el 13 de septiembre, ya que el resto son despreciables.

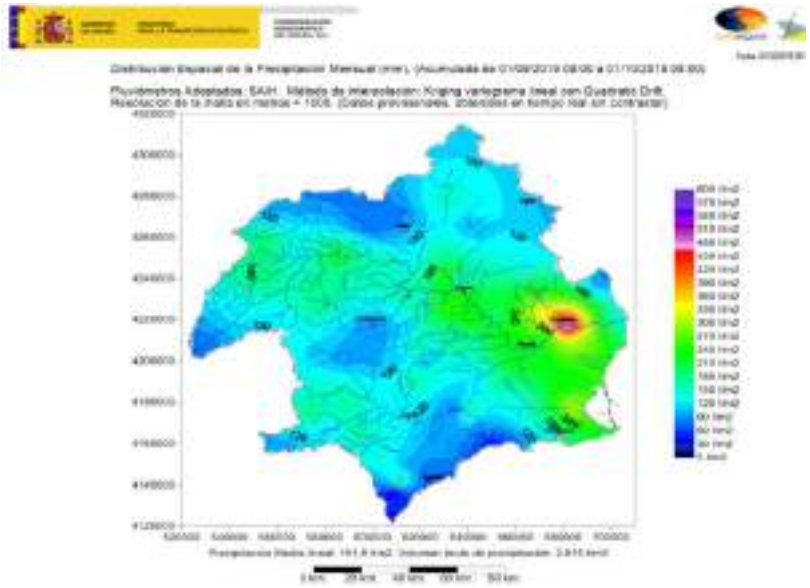


Figura 3. Distribución espacial de precipitación mensual en la cuenca del Segura. Fuente: CHS.

La figura ofrece una idea de la magnitud de las precipitaciones en la cuenca en general y de su distribución. Basta indicar que de las 127 estaciones pluviométricas controladas por la CHS en 28 de ellas (25% de las estaciones) el valor diario del día 12/9/19 superó los 150 mm con un máximo en Orihuela de 346 mm, en 38 (~30%) entre 100 y 150 mm y en 38 más (~ otro 30%) entre 50 y 100 mm.

Los valores más altos se encuentran todos en los cauces vertientes al Segura y la Vega Baja, siendo las precipitaciones poco relevantes en la cabecera del Segura y en el Guadalentín. En la tabla siguiente se presentan las medidas de intensidad diaria de precipitación registradas durante el mes de septiembre en los pluviómetros situados en, o próximos, a la Vega Baja.

Como se puede comprobar, solo ha habido precipitación significativa durante tres días (11, 12 y 13). Para tener una idea de nivel de lluvia que estos valores representan, se han comparado en la tabla 3 con los que el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), institución dependiente del Ministerio de Fomento, ha estimado para realizar los cálculos de caudales máximos resultantes en un punto de cualquier cauce de una cuenca hidrográfica en todo el territorio español (aplicación CAUMAX).

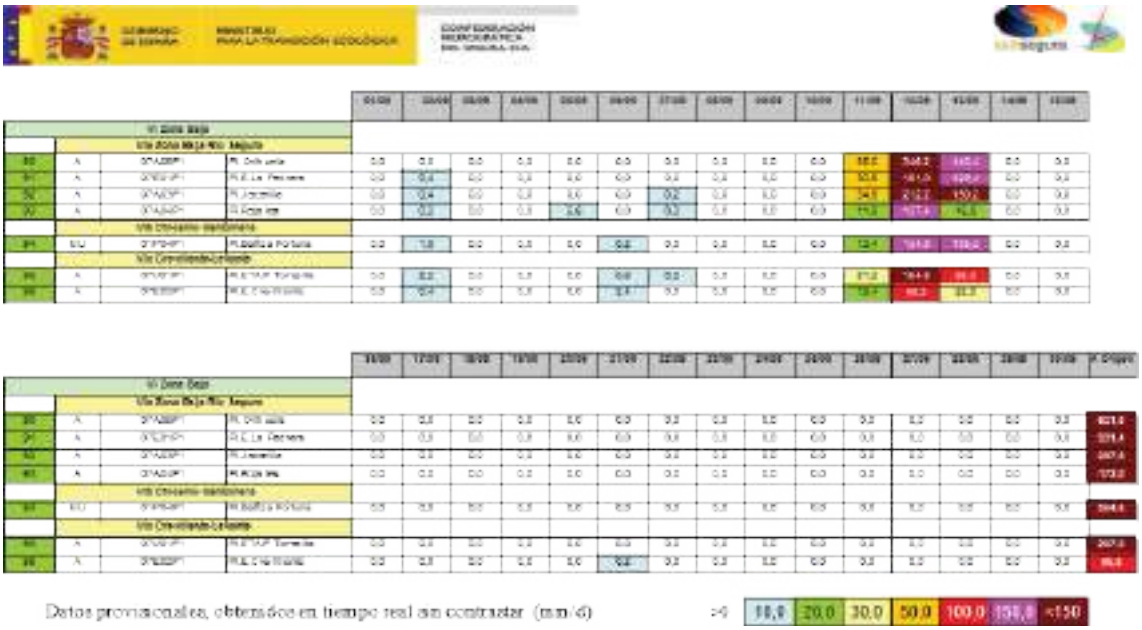


Tabla 2. Precipitación diaria en la cuenca del Segura. Fuente: CHS

Pluviómetros	Pd MAX Evento	Pd MAX T100	Pd MAX T500	Fecha
Pluv.Emb.Crevillente	62,2	129	174	12/09/2019
Pluv.Cab.Crevillente	178	143	193	12/09/2019
Pluv.Beniel	146	146	197	13/09/2019
Pluv.El Carche	51	123	167	13/09/2019
Pluv.EDAR.Torrealta	164,8	137	186	13/09/2019
Pluv.Emb.Santomera	160	152	205	12/09/2019
Pluv.Jacarilla	**212,2**	143	**193**	13/09/2019
Pluv. Bañosde Fortuna	134,8	137	186	13/09/2019
Pluv.Orihuela	**346,2**	146	**197**	12/09/2019
Pluv.Rojales	137,4	154	205	12/09/2019

Tabla 3. Comparación de precipitaciones máximas DANA 2019 con valores CAUMAX. Fuente: propia, CAUMAX.

Son notables los valores de las estaciones de Orihuela, Jacarilla, EDAR Torrealta (entre Abanilla y La Murada), Beniel y Cabecera del Canal Crevillente (junto a La Matanza), que suponen lluvias con periodo de retorno próximos o por encima de los 500 años, lo que explica la gravedad del episodio y justifica en parte la importancia de los daños.

3.2. Estimación de los caudales y volúmenes

Para estudiar la zona afectada se ha realizado un balance de masas de la lluvia acaecida. La aplicación informática utilizada para el modelo es HEC-HMS4.2, a partir de los datos pluviométricos del evento, extraídos del SAIH de la CHS. Para ello, se han empleado los pluviómetros, próximos al área de afección, que registraron el episodio desde el 11-09-2019 a las 00:00 hasta el 16-09-2019 a las 00:00.

El balance de masas se ha obtenido comparando los aportes pluviales que tuvieron entrada en la cuenca de la Vega Baja y los caudales de salida que se midieron durante las visitas a campo, fruto del contrato de emergencia “Actuaciones a realizar para la toma de datos de las inundaciones en la Vega

Baja del Segura de septiembre de 2019" adjudicado el 15/10/2019 por resolución de la Honorable Consellera de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica. Para obtener los caudales de salida se realizaron mediciones de los mismos en puntos de la red de drenaje que conforman la Vega Baja, formada por acequias y azarbes entre los que destacan los Azarbes del Convenio, de Enmedio, de la Reina, del Mayayo y de Pineda.

A partir de los datos de lluvia se procede a analizar el evento calculando hidrológicamente los aportes pluviales que recibe cada cuenca. Se muestran a continuación el volumen almacenado en la Vega Baja durante el episodio pluvial.

Subcuenca	Volumen (hm^3)
Rambla de Abanilla	74.02
Azarbe de la Anilla	13.26
Azarbe de la Rambla	4.13
Cuenca de la Vega Baja	19.67

Tabla 4. Aportes a la Vega Baja en hm^3 del episodio pluvial. Fuente: Fuente propia, HEC-HMS

Adicionalmente se muestran, a continuación, los caudales obtenidos en la modelización hidrológica para cada subcuenca y su comparación con el CAUMAX (CEDEX).

3.2.1. Subcuenca Rambla de Abanilla

En la rambla de Abanilla el máximo caudal obtenido en la modelización hidrológica es de 1410,2 m^3/s, lo que corresponde a un periodo de retorno levemente por encima de T300.

Periodo de retorno	Caudal (m^3/s)
2	23
5	54
10	79
25	143
100	858
500	1836

Tabla 5. Caudales en la rambla de Abanilla según periodo de retorno. Fuente: CAUMAX.

Se ha podido comprobar, a partir de datos e informaciones tomadas directamente en el azud de derivación de Benferri, que el caudal máximo de la avenida se estima en 1.255 m^3/s, al elevarse la lámina del agua 2'77 m sobre el propio azud. Este valor es algo menor al obtenido por la modelación hidrológica, pero representa una aproximación razonable (diferencia del 11%), teniendo en cuenta las simplificaciones que contemplan los procedimientos de cálculo.



Figura 4. Vertedero del azud de Benferri en la Rambla de Abanilla, junto al cementerio.

3.2.2. Subcuenca Azarbe de la Anilla

En la cuenca del azarbe de la Anilla el máximo caudal obtenido en la modelización hidrológica es de 441,7 m^3/s por lo que el periodo de retorno se sitúa levemente por debajo de 400 años (T400).

Periodo de retorno	Caudal (m^3/s)
2	7
5	18
10	27
25	46
100	219
500	472

Tabla 6. Caudales en la rambla del azarbe de la Anilla, según periodo de retorno. Fuente: Fuente propia, CAUMAX

3.2.3. Subcuenca Azarbe de la Rambla

En la cuenca afluente al azarbe de la Rambla el máximo caudal obtenido en la modelización hidrológica es de 58,8 m^3/s por lo que el periodo de retorno se sitúa próximo a T30.

Periodo de retorno	Caudal (m^3/s)
2	9
5	21
10	31
25	49
100	242
500	528

Tabla 7. Caudales en la rambla del azarbe de la Rambla, según periodo de retorno. Fuente: Fuente propia, CAUMAX.

3.2.4. Subcuenca Vega Baja

Los caudales obtenidos de las precipitaciones sobre la propia Vega baja suponen un volumen de 19,68 hm^3, que no se pueden comparar con los del CAUMAX al ser una cuenca muy difusa con diversos canales de drenaje que se entremezclan entre sí.

3.3. Aportaciones de las roturas del río Segura

Los caudales circulantes por el río Segura se han obtenido de las estaciones de aforo del SAIH de la CHS.

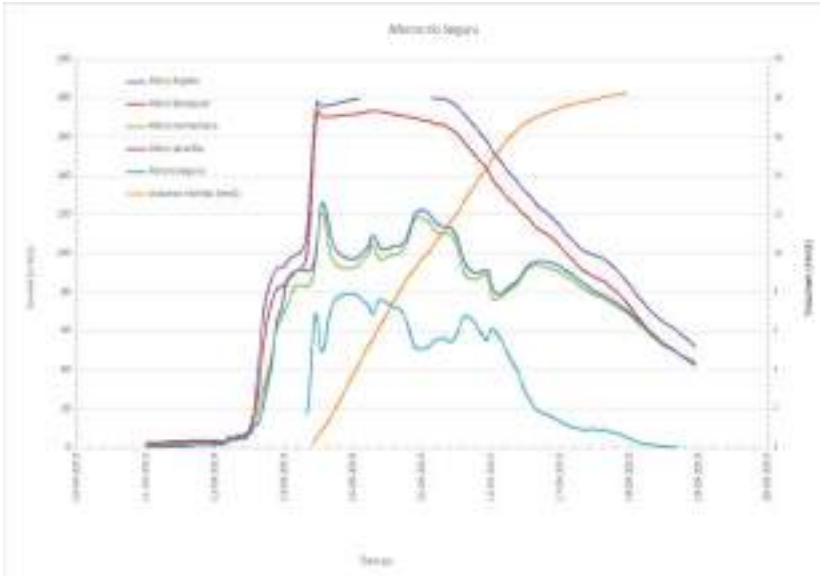


Figura 5. Hidrogramas de caudales en estaciones de aforo CHS. Volúmenes por día. Fuente: Propia. Datos CHS

Cabe destacar que algunos aforos no registraron temporalmente los caudales que transcurrían por el río y que se produjeron desbordamientos a lo largo del mismo, que no se han podido considerar por falta de datos. Los caudales vertidos por las roturas sufridas en las motas del margen izquierdo del río Segura, se obtienen por diferencia entre los datos de aforos anteriores (Benejúzar y Jacarilla) y posteriores (Rojales y Formentera del Segura) a las mismas. El volumen evacuado por el río hacia la Vega Baja se deduce considerando el tiempo transcurrido. Resulta por lo tanto un aporte volumétrico al llano debido a las roturas de 18,2 hm^3.

Hay que indicar que el caudal que figura en los datos de la CHS para Rojales y Formentera es muy similar y ofrece un máximo de 125m^3/s. De la observación directa del nivel en el puente de Rojales

durante la crecida se comprobó que el nivel estaba muy alto, a unos 15 cm de cubrir completamente los ojos del puente, lo que hace pensar en que la capacidad del cauce, salvo error de medida o calibrado, dista mucho de los 400 m^3/s que proponía el Plan de Defensa contra Inundaciones de 1987. Los datos de estos aforos consultados son coherentes entre sí. Podemos concluir que las aportaciones recibidas en el llano de inundación de la Vega Baja son:

Subcuenca	Volumen (hm^3)
Rambla de Abanilla	74.02
Azarbe de la Anilla	13.26
Azarbe de la Rambla	4.13
Cuenca de la Vega Baja	19.68
Roturas del río Segura	18.20
TOTAL APORTACIONES	**129.29**

Tabla 8. Aportaciones, parciales y total, en el llano de inundación de la Vega Baja. Fuente: Fuente propia, HEC-HMS.

3.4. Control del caudal drenado por la red existente

Los caudales de salida por los azarbes de la Vega Baja se han medido en campo mediante la herramienta de Flo-Mate modelo 2000 para determinar la velocidad, en los puntos indicados en la figura siguiente.

La toma de datos comenzó el 18 de septiembre de 2019, por ello, los datos correspondientes a los días anteriores se han obtenido extrapolando hasta el 13 de septiembre los resultados obtenidos, considerando, además, que es cuando los azarbes evacuan al máximo de su capacidad al tener el nivel máximo de inundación.



Figura 6. Puntos de aforo en campo de la red de Drenaje de la Vega Baja. (actuación de emergencia). Fuente: TYPSA.

De las mediciones efectuadas en los azarbes se han podido obtener los volúmenes desaguados al mar por la red de riego existente, único drenaje actual del llano. Los datos obtenidos son:

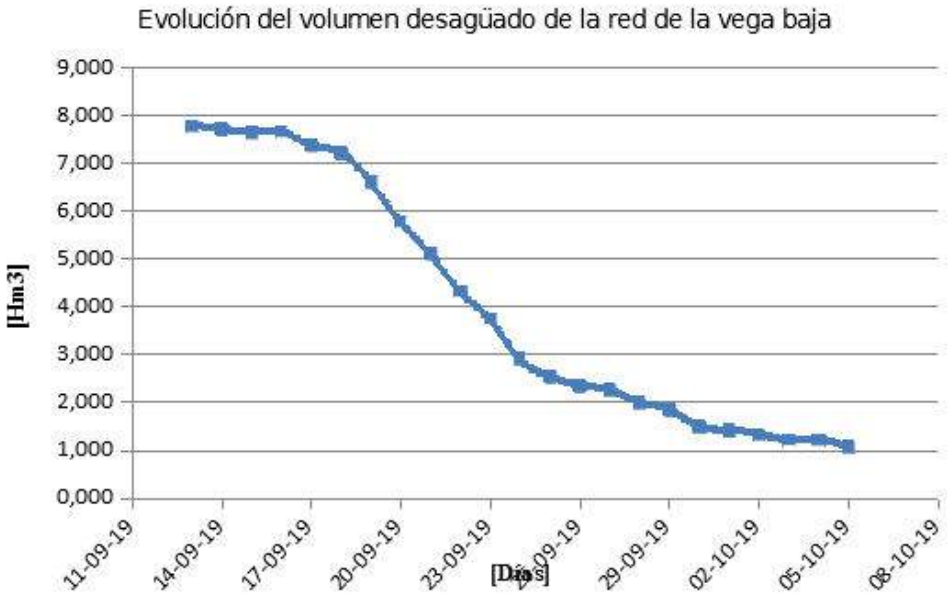


Figura 7. Puntos Volumen diario drenado por red actual. Fuente: TYPSA.

Con ello el balance de masas hasta el día 8/10/2019 resulta:

Balance de Masas DANA 2019	hm^3
Cuencas de aportación	129,3
Red de drenaje Vega baja	92,53
TOTAL ACUMULADO	36,77

Tabla 9. Balance de masas Vega Baja. Fuente: elaboración propia.

3.5. Evaluación de daños

El área en estudio tiene aproximadamente 150 km^2, siendo una de las principales actividades económicas la agricultura: se estima que existen en torno a 80 km^2 de tierras productivas, esto es, 8.000 ha. El presidente de ASAJA-Alicante, Eladio Aniorte, indicó, el día 24/09/2019 en el diario ABC, unas pérdidas del sector agroalimentario de 550 M€, incluyendo los lucros cesantes por pérdidas de cosechas y pérdida de especies arbóreas.

En el diario el Mundo, se recoge la misma noticia el día 19/09/2019, indicando 305 M€ de pérdidas por cosechas, cifrando la pérdida en la provincia de Alicante en 817 M€.

El periódico Alicante Plaza publica el 18/09/2019 las pérdidas globales estimadas inicialmente por la Generalitat Valenciana, valoradas en 1500 M€, aunque no desagrega los valores por áreas.

El Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), en su Cuarta Nota Informativa de fecha 23 de octubre de 2019 sobre las inundaciones producidas entre los días 11 y 15 de septiembre en el Sureste, indica que ha recibido de las provincias de Alicante y Valencia, 24.286 solicitudes de indemnización,

de las que 13.908 corresponden a viviendas y comunidades de propietarios, 7.648 a vehículos, 2.078 a comercios y oficinas, 634 a industrias y 18 a obras civiles. El coste total estimado es de 171,2 M€. Las localidades más dañadas son Orihuela (8.183 solicitudes de indemnización recibidas), Almoradí (1.649 solicitudes), Dolores (1.601), Santa Pola (905), Catral (815), Pilar de la Horodada (794), Elche (759), Redován (738) y Bigastro (650) en la provincia de Alicante, y Ontinyent (1.200 solicitudes) en la provincia de Valencia. Hay que destacar que el CCS solo recoge en su informe las reclamaciones formuladas ante ellos, no considerando, lógicamente, los daños de bienes no asegurados ni los daños en agricultura ni en infraestructuras públicas.

En el mismo informe, el CCS detalla los datos de la región de Murcia, donde las reclamaciones en la cuenca del Segura (Murcia, Molina de Segura, Cieza y Beniel) son 9.362, por un importe estimado (en proporción al importe total autonómico, ya que no hay importe desglosado por municipios) de 62,0 M€, en una superficie considerablemente superior a la Vega Baja y una población de más del doble. Es decir, aparentemente los daños en las Vegas Media y Alta son considerablemente menores que en la Baja, lo que significa que el comportamiento de las infraestructuras existentes en las zonas altas y media fue mejor, si bien la pluviometría también fue menor.

En resumen, las grandes pérdidas de las inundaciones se han centrado en:

- Agricultura con la pérdida de cosechas y arbolado, generando grandes pérdidas en el sector agroalimentario.
- Industria, los polígonos industriales de Redován y Puente Alto en Orihuela han sufrido severos daños debido a la crecida de la Rambla Abanilla, así como el P.I. de Almoradí debido a la rotura de la Mota de Margen izquierda del río Segura en T.M. de Almoradí.
- Viviendas y bienes muebles tanto de propietarios particulares como institucionales.
- Daños sufridos en infraestructuras: carreteras, redes de comunicación, eléctrica, abastecimiento y saneamiento, redes de riego, etc.
- Perdidas de jornales y de actividad productiva en industria y agricultura.

En el momento de la redacción del presente documento no existen publicaciones concretas con estimaciones de daños por términos municipales, pero se puede concluir que la pérdida global para la Vega Baja del Segura ha alcanzado varios cientos de millones de euros solo en este episodio.

4. LÍNEAS DE ACTUACIÓN PARA UN NUEVO PLAN DE DEFENSA

La solución a la problemática presentada es difícil y compleja, no siendo posible en este estudio precisar y definir actuaciones concretas. No obstante, se pueden esbozar diversas líneas de trabajo y alternativas, que orienten los próximos pasos a realizar para el análisis profundo y de detalle de actuaciones en la búsqueda de una solución.

Desde el punto de vista de las competencias podemos distinguir dos grandes ámbitos: por un lado, el tratamiento de los cauces pertenecientes al dominio público hidráulico gestionados por la Confederaciones Hidrográficas, tanto del Segura como del Júcar en sus respectivas demarcaciones, y de otro los cauces en suelo urbano (competencia municipal y/o autonómica) y redes de regadío privadas. Cuando la solución de un problema, en principio, de competencia municipal en el suelo urbano, excede de los límites de su término o afecta a una gran parte de la comarca, es necesaria la coordinación y actuación de niveles superiores de la administración, como la autonómica.

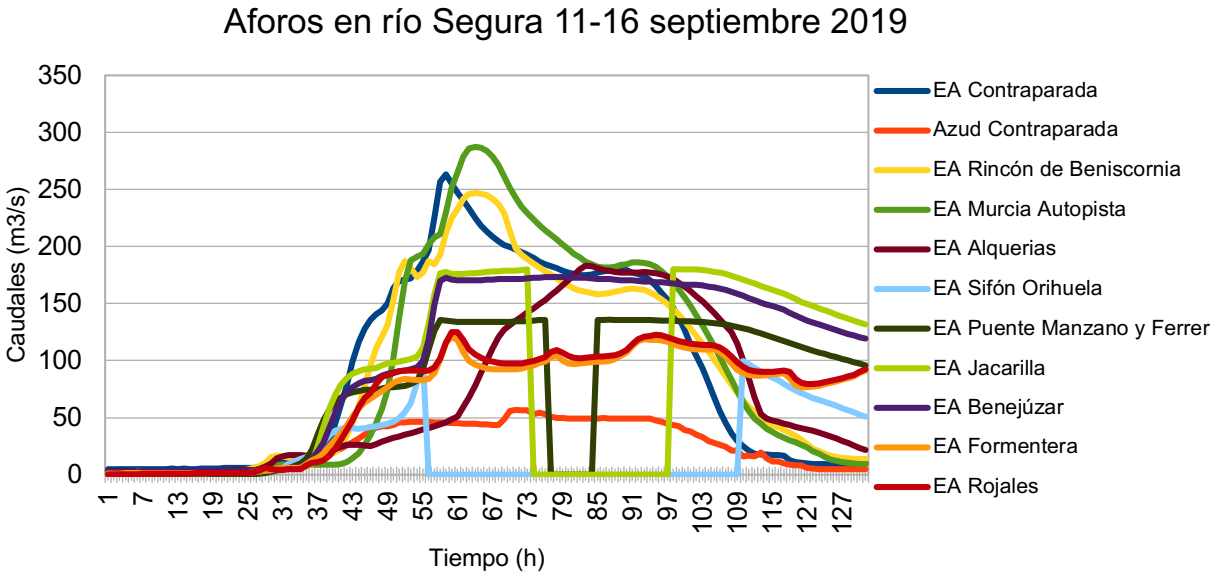
En este caso, los dos ámbitos enunciados (estado y autonomía/municipio) se encuentran claramente diferenciados, ya que los primeros son los que aportan los caudales al llano de inundación, mientras que los segundos, de orden local y comarcal, son por donde drena actualmente el mismo. Se desglosan las propuestas siguiendo esta distinción.

4.1. Control de caudales externos a la Vega Baja

En primer lugar, será necesario analizar el funcionamiento del encauzamiento del río Segura y de las infraestructuras realizadas con el Plan de Defensa contra Avenidas del año 1987 a lo largo de toda la cuenca, para detectar deficiencias y problemas, que permitan diseñar mejoras en su respuesta. Se debe avanzar en el control de ramblas en la Vega Media, como Garruchal y Tabala, para las que, al parecer, ya existen estudios previos e incluso algún proyecto.

El comportamiento en este episodio de lluvias del encauzamiento del Segura y de las actuaciones realizadas ha sido razonablemente bueno. Pese a las elevadas precipitaciones soportadas por la cuenca receptora siguiendo el curso principal del río, probablemente por encima del periodo de retorno (50 años) para el que estaba previsto el plan, no se ha desbordado más que puntualmente (Orihuela, El Raal y Almoradí por rotura de la mota). La avenida se ha laminado considerablemente. No obstante, es necesario tener en cuenta que una parte importante de la cuenca, la del Guadalentín, tradicionalmente causante de grandes daños, no aportó prácticamente caudal al ser las precipitaciones menores y contar con elementos de laminación del plan.

Figura 8. Hidrograma de caudales avenida en estaciones aforo río Segura.



Fuente: elaboración Propia con datos de la CHS.

Es destacable que los datos de las estaciones de aforo comprendidas entre la E.A. de la Contraparada en Murcia y E.A. de Rojales en Alicante muestran valores en apariencia no coherentes (importantes diferencias de caudales punta, hidrogramas y volumen acumulado). Por otro lado, el caudal medido con niveles cerca de desbordar en algunos puntos es significativamente inferior a la capacidad teórica del cauce. Ello induce a pensar que, o bien los aforos no están bien calibrados, o que es necesario revisar los cálculos hidráulicos.

En este evento los grandes daños en la Vega Baja han venido derivados, sobre todo, de las aportaciones de la Rambla de Abanilla y, en menor medida, de las de las ramblas de la sierra de Crevillente y de los aportes del río y sus azarbes en la Vega Media. Son precisamente en estos cauces donde no se había realizado actuaciones previas (solo una de insuficiente alcance).

Parece adecuado, por tanto, repetir en los cauces sobre los que no se ha actuado a la fecha, la estrategia que ha funcionado anteriormente en el cauce principal, es decir:

- Laminar las escorrentías en la medida de lo posible antes de entregarlas en el llano de inundación.
- Conducir los caudales no laminados hasta un punto de vertido donde no se provoquen daños sustanciales, que equivale a encauzar las ramblas con la capacidad suficiente para los caudales punta resultantes de la laminación previa.

En la rambla de Abanilla, por su entidad, no será posible probablemente encontrar un emplazamiento para un embalse suficiente, sin embargo, de nuevo se puede recurrir a la estrategia del plan e ir realizando pequeñas presas de laminación en las ramblas y cauces tributarios a la rambla principal. La laminación es necesaria, habida cuenta de que el caudal de aportación puede ser lo suficientemente grande para no permitir la ejecución de un encauzamiento capaz para conducir la avenida hasta el lugar apropiado. Caben también actuaciones de aterrazamientos y/o repoblación forestal en la cuenca para tratar de disminuir el coeficiente de escorrentía. El lugar de entrega solo podría ser el mar o el nuevo cauce del Segura. No obstante, el río, por su ajustada capacidad, como se ha visto en el episodio actual, no parece el punto apropiado, salvo una ampliación de su cauce.

En las ramblas de la sierra de Crevillente cabría laminar de forma independiente o conjunta, conectando varias entre si mediante canales transversales, ya que sus avenidas son considerablemente menores en caudal punta y volumen acumulado, optimizando así capacidades de laminación. Los encauzamientos posteriores llevarían los caudales aliviados a la red de drenaje del llano de inundación (azarbes y acequias), como hasta ahora, pero será necesario ampliarla para evitar desbordamientos, puesto que su capacidad actual no soporta ni siquiera la avenida de una de dichas ramblas (azarbe del Convenio).

4.2. Control de caudales internos a la Vega Baja

Respecto al drenaje de las aguas que alcanzan el llano de inundación y de las lluvias sobre la propia área, solo cabe la alternativa de evacuarlas a través de la red de riego existente, disminuyendo así, en la medida de lo posible, nuevas ocupaciones de suelo y aprovechando al máximo la infraestructura existente. Es preciso mejorar el mantenimiento y limpieza del sistema.

No obstante, de las observaciones realizadas se ha comprobado que será necesario modificar y ampliar la red de azarbes actual por ser insuficiente, lo que provoca que la inundación se prolongue considerablemente en el tiempo (en el último episodio hasta tres semanas en amplias zonas). Una de las alternativas a estudiar es convertir la red ramificada existente en una red mallada, interconectando los canales entre sí y dotándolos de compuertas de aislamiento, lo que permitiría mejorar el caudal drenado, aprovechando al máximo su capacidad. Para ello, es necesario elaborar un modelo digital terrestre con precisión centimétrica y un levantamiento y caracterización de todos los canales existentes, para elaborar un modelo de flujo bidimensional del llano de inundación que permita determinar cómo distribuir los caudales de avenida de forma óptima.

Junto al azarbe del Convenio se van incorporando en paralelo otros azarbes (Riacho, Pineda, Mayayo), manteniendo una separación de una decena de metros o menos entre ellos. Una alternativa a estudiar consiste en rebajar las zonas entre azarbes manteniendo una bancada intermedia por encima del nivel de aguas bajas, por donde se efectuarían las labores de mantenimiento. De esta forma se conseguiría aumentar la sección de evacuación en situación de lluvias, mientras que se mantendría su función particular para el riego en tiempo seco. Desde el punto de vista medioambiental se consolidaría amplios corredores comarcales con el oportuno tratamiento de superficies y vegetal.

En cualquier caso, la aportación residual de caudal que realice la rambla de Abanilla tras efectuar las actuaciones de laminación de la cuenca, dada su entidad, no podrá ser evacuada a través de la red de riego. Es necesario analizar la ejecución de un nuevo encauzamiento para dichas aguas hasta el mar.

Además, se ha constatado que en todos los episodios de crecidas ocurridos ha habido una u otra incidencia en las motas del río, que ha provocado la salida de aguas del Segura hacia la Vega. Estas aguas se han extendido después por el llano sin tener posibilidad de retorno al cauce debido a la pendiente natural hacia el noreste, inundando una zona u otra en función del punto de rotura, de la topografía y de los obstáculos que encuentre. Por ello, se debe estudiar la ejecución de azarbes mayores sensiblemente paralelos al nuevo cauce del río, que permitieran, por un lado, dar continuidad a las aguas afluentes a la vega de las ramblas exteriores no encauzadas y conducir, en su caso, las aportaciones por rotura o desborde del río Segura mejorando su capacidad actual, aunque fuera de forma parcial.

Otra opción para minimizar los daños es generar en el propio llano de inundación zonas de sacrificio donde acumular la escorrentía en áreas con poco rendimiento, laminando los excesos de caudal. Permitirían, además, crear espacios medioambientalmente favorables para mejorar el entorno del Parque Natural del Hondo o bien dedicarlas a cultivos anuales de poco coste de producción.

Se debe analizar la permeabilización de las infraestructuras de transporte frente a flujos transversales a las mismas, lo que permitiría que en momentos de crecidas de alto periodo de retorno se disminuyesen los tiempos de inundación. Este aspecto es reseñable en las carreteras CV-861, CV-860, CV-855 y N-332.

Mejora y mantenimiento de la capacidad del antiguo cauce del río Segura, por donde evacuan sus aguas todos los azarbes de la Vega Baja. Estudio de su comportamiento en momentos de avenidas por el cauce nuevo y considerando el efecto de la sobreelevación del nivel del mar. Análisis de la necesidad de establecer una conexión entre el antiguo cauce y el nuevo en la zona de la desembocadura, controlado mediante compuertas. Esta situación, posiblemente contribuiría a aumentar la capacidad de desagüe de los azarbes, si la inundación en la Vega Baja no es concomitante con la crecida del río Segura.

Como complemento a la mejora de la capacidad de la red de azarbes existentes se debe analizar la conveniencia de colocar un bombeo de gran capacidad (varias decenas de m^3/s) en puntos bajos intermedios y/o en la zona final del antiguo cauce del Segura, que mejorará el desagüe del sistema.

4.3. Problemas locales

Hasta aquí se han propuesto líneas de estudio y medidas a adoptar para la solución de los drenajes de ámbito regional y comarcal. Quedan por resolver una considerable cantidad de situaciones de riesgo en muchas de las poblaciones de la comarca, pero son afecciones individuales propiciadas por las ramblas que desaguan desde las sierras próximas a los cascos urbanos y que atraviesan con gran velocidad. Es el caso de Orihuela y Rincón de Bonanza, Redován, Cox, Callosa de Segura, Jacarilla, Bigastro, etc. Estas ramblas presentan la característica de generar crecidas repentinas, muy intensas (decenas de m^3/s) pero de relativa corta duración, debido a las fuertes pendientes y el corto tiempo de concentración que presentan. Aunque su canalización es relativamente sencilla, se encuentran con el problema de que no tiene un cauce donde verter. Por ello, su solución comienza con las actuaciones para controlar los caudales externos e internos de los apartados anteriores, puesto que la creación de nuevos cauces y/o la mejora del sistema de drenaje existente permitirá la conexión de las nuevas canalizaciones a realizar.

5. CONCLUSIÓN

Se relacionan a continuación los aspectos más relevantes del informe:

- La crecida acaecida en la Vega Baja del Segura en septiembre de 2019 es un episodio de lluvias extraordinario. Con los datos de la serie histórica existente se estima que representa un periodo de retorno próximo o superior a T=500 años en algunas áreas de la Vega.

Considerando las avenidas históricas publicadas por la Confederación Hidrográfica del Segura se observan crecidas importantes debidas a la Rambla de Abanilla y Sierra de Crevillente en 1947, 1973, 1982, 1987 y 2019, siendo las crecidas que afectan a la Vega Baja del Segura un fenómeno recurrente, que se puede repetir mañana.

- El comportamiento de las infraestructuras realizadas en la cuenca del Segura durante el Plan de Defensas contra Avenidas del año 1987 ha sido correcto, salvo hechos puntuales. Solo hay una actuación de defensa realizada en la rambla de Abanilla y es a todas luces insuficiente.
- Pese a no haber analizado en este estudio las aportaciones procedentes de la cuenca del Vinalopó, por no haber tenido relevancia en este evento, es necesario considerarlas para el análisis completo del problema, considerando que el llano de inundación es el mismo y que aunque está parcialmente compartimentado puede tener conexión con el Segura en condiciones extraordinarias, además de las propias afecciones a las urbanizaciones y edificaciones del campo bajo de Elche y la zona de las salinas de Santa Pola.
- La Rambla de Abanilla alivia las aguas de una cuenca de unos 444 km^2. En la crecida de septiembre de 2019, a partir de observaciones realizadas en Benferri, se estima un caudal punta superior a 1.200 m^3/s. A partir de los cálculos realizados y la realidad observada se establece que la Rambla de Abanilla, los barrancos de la Sierra de Crevillente y las aportaciones del río por roturas y de la Vega Media derivaron a la Vega Baja un volumen próximo a los 130 hm^3 entre los días 12 y 15 de septiembre.
- La Rambla de Abanilla presenta una gran dificultad respecto al alivio de caudales, debido a que desemboca en su llanura de inundación entre las sierras de Orihuela y Callosa a unos 27 km del mar, y también debido a que su cauce desaparece entre campos de cultivo a los que entrega las aguas, que se distribuyen por el llano en función de las actuaciones humanas y obstáculos que se encuentran.
- Las inundaciones en La Vega Baja se vieron incrementadas por la rotura de las motas de margen izquierda del río Segura, principalmente en término municipal de Almoradí, a la altura del cruce de la carretera CV-935, inyectando un caudal medio de 50 m^3/s con un volumen total aportado en torno a 18,2 hm^3.
- Desde el punto de vista urbanístico, los cascos urbanos de los municipios del área están ligeramente elevados sobre el área adyacente de huerta, protegiéndose de este modo frente a crecidas de bajo periodo de retorno, quedando expuestos a crecidas de altos periodo de retorno, en especial San Bartolomé, Rafal, Dolores, Almoradí, Daya Nueva, Daya Vieja y San Fulgencio. Los municipios de Heredades, Formentera del Segura y Rojales, han presentado problemas en la crecida fundamentalmente por la rotura de las motas de margen izquierda del río Segura. Las áreas de huerta, debido a su cota y poca pendiente, están expuestas a inundaciones para bajos periodos de retorno. Existe alguna población y áreas aledañas que sufren inundaciones con lluvias de solo 2 años de periodo de retorno.
- Como medida complementaria se debe estudiar la conveniencia de compartimentar determinadas áreas de la Vega Baja, poblaciones o zonas susceptibles de sufrir graves daños, mediante la disposición de motas alrededor o de protección parcial, que evitará que el flujo de la avenida discurriera por las mismas, evitando producir daños. Ello debería ir acompañado de medidas complementarias, como bombeos y adaptación de las canalizaciones de riego para evitar la inundación de los compartimentos así generados. El sistema se puede apoyar en las carreteras e infraestructuras sobrelevadas existentes. Será preciso analizar que la generación de estos compartimentos no genera perjuicios en las zonas de su entorno.
- La existencia de vías de comunicación terrestre elevadas sobre el área adyacente ha contribuido al direccionamiento de los flujos y también ha provocado que se prolongue el embalsamiento en algunas áreas, por lo que es necesario revisar su diseño y permeabilizar su traza.
- En resumen, la comarca de la Vega Baja, debido a su configuración de planicie, la inexistencia de vías de alivio para los caudales derivados desde la Rambla de Abanilla y a la insuficiencia

de infraestructuras para el alivio de las aguas procedentes de la sierra de Crevillente, así como la ajustada capacidad del nuevo cauce del río Segura, provoca que sea un área vulnerable a inundaciones incluso por las lluvias caídas sobre el mismo territorio en episodios de bajo de periodo de retorno.

- La solución a este problema no es únicamente de orden técnico, pese a su complejidad en este campo, sino también afecta a cuestiones sociales, medioambientales, urbanísticas, económicas y administrativas. Por lo que es necesario convocar a representantes de todos estos sectores para debatir el alcance del objetivo a conseguir, los medios a emplear y el coste que cada sector está dispuesto a satisfacer (no solo económico).
- La solución se debe plantear desde un punto de vista global, no siendo adecuado alternativas parciales que dejen a un lado al resto del conjunto. Desde la perspectiva administrativa, por sus competencias, y de los diversos grupos afectados es necesario contemplar el problema en su conjunto y avanzar y resolverlo coordinadamente. Es conocido que se han realizado algunas actuaciones de ámbito local que han roto el equilibrio existente, mejorando unas zonas en detrimento de otras.
- Las actuaciones a realizar, pese a ser costosas, (se estima que las propuestas realizadas alcanzarán varios centenares de millones de euros) se verían compensadas con tan solo mitigar el próximo evento, que antes o después ocurrirá. Los daños de la avenida de septiembre se situarán en un entorno próximo al millar de millones de euros entre reclamaciones al Consorcio de Compensación de Seguros, pérdidas en producción agrícola actual y futura, daños a infraestructuras, daños a la industria, pérdidas de lucro cesante, pérdidas de salario y productividad.

INCREMENTO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO Y POSIBLE NO ESTACIONARIEDAD DE FENÓMENOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS RELATIVOS A CRECIDAS E INUNDACIONES

Francisco Cabezas Calvo-Rubio
Instituto Euromediterráno del Agua y Profesor Asociado de la Universidad de Murcia
cabezas@um.es

RESUMEN

En las últimas décadas parece observarse una intensificación de las lluvias extremas de forma relativamente generalizada, con importantes impactos sobre las inundaciones de las áreas ribereñas afectadas. Tanto los volúmenes de los hidrogramas en las crecidas como sus caudales punta parecen incrementarse, junto con la carga sedimentaria movilizada, ocasionando problemas de seguridad e importantes impactos socioeconómicos. En este trabajo se analiza esta situación a raíz de los recientes episodios de DANA en el sureste peninsular, contrastando la información hidrológica previamente disponible con la información posteriormente ampliada, una vez producidos los episodios lluviosos. Aún con el carácter de una primera aproximación, se comprueba que las recientes DANAs efectivamente afectan a los datos previamente aceptados para el diseño de defensas frente a crecidas, poniendo de manifiesto la necesidad de su urgente actualización, máxime si se van a abordar inversiones cuyo dimensionamiento requiere de tales datos de partida. Junto con los datos, se recomienda también abordar una revisión metodológica de este problema, reconsiderando conceptos técnicos tradicionales, como el de periodo de retorno, ante la posibilidad de comportamientos no estacionarios de los fenómenos extremos. Para avanzar en estas tareas es imprescindible la disponibilidad de bases de datos extendidas y fiables.

1. INTRODUCCIÓN

El reciente episodio de DANA, producido en septiembre de 2019 en amplias extensiones del territorio peninsular, ha ocasionado unas lluvias intensas de tal magnitud que el conocimiento y consideración de estos nuevos datos, junto con otros también recientes de alta intensidad, podría afectar a las estimaciones estadísticas hoy aceptadas sobre lluvias máximas en el área afectada y, en consecuencia, a los correspondientes caudales de avenidas de diseño.

A ello se suma la ocurrencia de otros episodios singulares, con muy elevadas precipitaciones, producidos en los últimos 10 años. Es el caso de las lluvias torrenciales del 28 de septiembre de 2012, que afectaron a Lorca y Puerto Lumbreras con valores registrados de 177 mm; también de las tormentas del 17 y 18 de diciembre de 2016 en la comarca del Mar Menor, con hasta 227 mm recogidos en 2 días en Los Alcázares; la DANA del 16 al 19 de septiembre de 2019, con registros que superaron los máximos históricos registrados hasta entonces, como 204 mm en 24 horas en San Javier; el posterior episodio del 3 de diciembre de 2019, con menor intensidad pero que llegó a alcanzar los 120 mm en 24 horas en San Javier; las tormentas del 21 de enero de 2020 en el área de San Pedro del Pinatar, con más de 40 mm descargados en 4 horas; o las fuertes lluvias del 24 de marzo de 2020 en Los Alcázares, que además se superpusieron a la emergencia sanitaría provocada por el COVID-19 y el estado de alarma decretado para todo el país.

Aunque las fuertes tormentas ocasionales son relativamente frecuentes en estos territorios, se trata sin duda de una llamativa concentración de episodios extremos en la misma zona geográfica y en un periodo de tiempo reducido. Para contrastar la posibilidad de que estos sucesos recientes hayan alterado sensiblemente las propiedades estadísticas de las lluvias máximas en el ámbito territorial del sureste, con resultados previsiblemente extensibles a áreas próximas, se han realizado diferentes análisis que permiten adquirir una primera idea de la situación y las magnitudes involucradas.

En primer lugar, se ha planteado un tanteo simple en una cuenca con tamaño y características tipo del área del Campo de Cartagena para los periodos de retorno de 100 y 500 años, empleados rutinariamente en los estudios de avenidas, lo que permite valorar la relevancia del citado efecto en ese territorio y para una cuenca considerada representativa.

En segundo lugar, y para contrastar la validez de esas conclusiones en un territorio más extenso, se realizado un análisis preliminar de las lluvias máximas diarias en la cuenca del Segura para los periodos de retorno de 100 y 500 años, y se han aplicado a diferentes cuencas en este ámbito, con diferentes superficies, umbrales de escorrentía, e hipótesis de lluvia máxima, considerando o no los últimos 10 años de la serie, que cubren los episodios extremos antes mencionados.

En tercer lugar, se han contrastado los valores de la lluvia máxima de periodo de retorno de 100 años, P100, estimada con la serie actual, y los valores estimada con la serie de hasta hace 20 años, periodo de contraste de las últimas estadísticas publicadas.

Finalmente, en cuarto lugar, se han indagado las posibles tendencias en las estimaciones de la P100 dependiendo de la ventana temporal empleada. Los resultados obtenidos en estos análisis permiten, aún con el carácter de un primer tanteo provisional, obtener las conclusiones que se mostrarán más adelante.

2. ANÁLISIS DE UNA CUENCA TIPO EN EL CAMPO DE CARTAGENA

2.1. Lluvias máximas

Existen numerosos antecedentes de estudios de lluvias máximas diarias en el ámbito peninsular y regional, que es el dato básico para el diseño de actuaciones de defensa contra las inundaciones.

Ejemplos relativamente recientes son el muy conocido mapa de 1978, de la Dirección General de Carreteras del MOPU, de *Isolíneas de precipitaciones máximas previsibles en un día*, elaboradas con datos hasta 1970.

De 1992 es el estudio de la CARM en el que se analizó la inundabilidad de ramblas costeras y se generaron mapas de lluvias máximas en este ámbito costero, utilizando por vez primera de forma regional la distribución SQRT-ET max, y empleando una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia de las tormentas específicamente adaptada a este ámbito, construida con información de pluviógrafos de la zona (Murcia, Alcantarilla y San Javier).

En 1999 la DGC del Ministerio de Fomento actualizó el anterior trabajo de 1978, empleando 1545 estaciones básicas con 30 o más años de registros. En esta actualización MFO-1999 se propuso también como distribución de lluvias diarias extremas la SQRT-ET max, con un mecanismo de regionalización basado en índices de avenida, y obteniendo unos resultados de lluvias máximas que se han adoptado directamente en muchos trabajos posteriores como INUNMUR, de 2007, o CAUMAX, de 2014, cuya Memoria Técnica se redactó en 2011 empleando la estimación de MFO-1999 para las lluvias máximas.

En los análisis que se plantean en este documento se valorará tan solo el efecto de alteración de lluvias máximas diarias, asumiendo las hipótesis del mantenimiento de las curvas intensidad-duración-frecuencia de tormentas propuestas en MFO-1999, si bien las extraordinariamente elevadas intensidades observadas en la DANA-2019 permiten dudar de la validez de este supuesto y aconsejan una revisión de tales curvas, también fundamentales para la estimación de los caudales punta de diseño. La intensificación de las curvas IDF aumentaría aún más estos caudales.

Centrando el análisis en las lluvias máximas puede afirmarse, en definitiva, que la fuente estándar actual de referencia sobre lluvias extremas en la España peninsular es este trabajo de MFO-1999, y sus resultados, especialmente a través de CAUMAX, han sido ampliamente utilizados en numerosos estudios posteriores de crecidas e inundaciones en todo el país, realizados a lo largo del siglo XXI.

En el caso concreto del Campo de Cartagena, la aplicación de MFO-1999 ofrece los siguientes resultados medios representativos (v. mapa de isolineas P_{med}, C_v, y tabla K_T): P_{med}=55; C_v=0.51; K_{100}=2.815; K_{500}=3.799. Con todo ello, las lluvias máximas diarias resultantes en la zona para, los dos periodos de retorno considerados, son: P_{100}=155 mm; P_{500}=209 mm.

2.2. Caudales máximos

Como se indicó, para estimar los caudales máximos correspondientes a estas lluvias se ha supuesto una subcuenca hipotética de prueba, con tamaño y condiciones de tipo medio, no coincidente con ninguna cuenca real, pero considerada como cuenca tipo representativa de las cuencas del Campo de Cartagena, vertientes al Mar Menor.

Las características supuestas para esta cuenca son: Superficie 100 km^2; longitud del cauce principal 15 km; altura de la cuenca 200 m; suelos de tipo B según la clasificación hidrológica SCS; umbral inicial de escorrentía 20 mm.

Aunque formalmente se recomienda para superficies menores de 50 km^2, aplicando la vigente Instrucción 5.2. IC-2016 a esta cuenca tipo, con las lluvias antes indicadas, los caudales de avenida resultantes son Q_{100}=221 m^3/s; Q_{500}=402 m^3/s.

2.3. Situación tras la DANA 2019

Para evaluar el impacto de los nuevos datos de lluvias máximas disponibles desde MFO-1999, incluyendo en lo posible el muy significativo episodio de DANA de septiembre de 2019 y el también significativo de diciembre de 2016, ambos posteriores a esa estimación, se ha repetido el análisis anterior de precipitaciones y caudales, con los mismos criterios y la misma cuenca tipo, y modificando tan solo las series de lluvias máximas empleadas en el cálculo de P_{100} y P_{500} para las dos situaciones, antes y después de los episodios recientes.

Para ello se han identificado las estaciones pluviométricas en el área (v. mapa), se han ampliado sus series hasta hoy, incluyendo la DANA-2019 cuando se ha podido disponer del dato que, por ser tan reciente, aún no se ha incorporado a las bases de datos estándares, y se ha aplicado de nuevo la misma distribución estadística empleada en MFO-1999 (SQRT-ET max) a todas las series con longitudes mayores o iguales a 30 años, igual que se hizo entonces.

El número de estaciones (AEMET y SIAM) en el entorno del Campo de Cartagena finalmente elegidas que satisfacen tal requisito ha sido de 23, distribuidas por todo el territorio.

Para este análisis preliminar no se ha realizado ninguna depuración y preproceso de esos datos, tomándolos directamente de la base disponible, construida como se ha apuntado.

Ello puede suponer algún error o distorsión puntual en las series que no alteraría sustancialmente los resultados obtenidos. En análisis posteriores más detallados el preproceso y depuración de las bases de datos debiera realizarse de forma preceptiva, completándolas en su totalidad hasta hoy, de forma que cubran al menos el año 2019 completo.

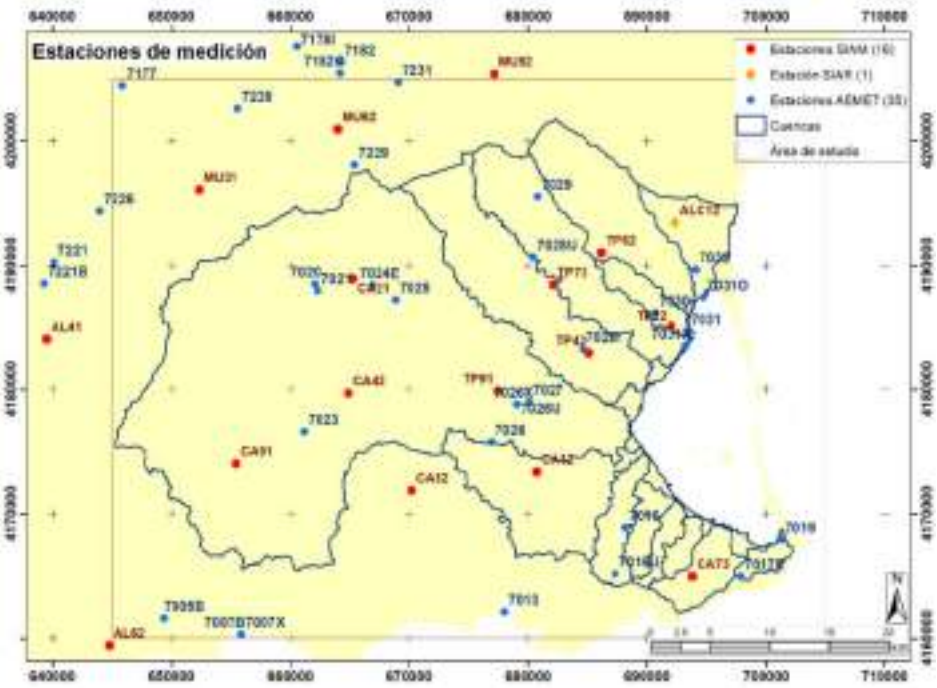


Figura 1. Estaciones identificadas de las redes AEMET y SIAR-SIAM en el entorno del Campo de Cartagena.

Ajustada la distribución SQRT-ET max a cada serie anual de máximos diarios mediante un método numérico de máxima verosimilitud, se han calculado los valores de lluvias diarias correspondientes a los periodos de retorno de 100 y 500 años.

Los valores medios obtenidos han sido de P_{100}=176 mm; P_{500}=246 mm, apreciablemente mayores que los 155 y 209 mm ofrecidos en MFO-99. La media y coeficiente de variación medios de las 23 series son de 52 mm y 0.57.

El primer valor es concordante con los mostrados en el mapa de MFO-1999 (v. mapa de detalle adjunto), pero el segundo es claramente mayor, hasta el punto de que, como puede verse, ni siquiera aparece en la tabla de los factores de amplificación K_T, quedando fuera de rango, por encima del máximo.

Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular 13

	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
C_v	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.915	2.220	2.556	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.618	2.052	2.403	2.785	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.626	2.068	2.434	2.816	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Tabla 7.1 - Cuantiles Y_T ,de la Ley SQRT-ET max, también denominados Factores de Amplificación K_T, en el "Mapa para el Cálculo de Máximas Precipitaciones Diarias en la España Peninsular" (1997).

Tabla 1. Factores de amplificación KT (MFO-1999).

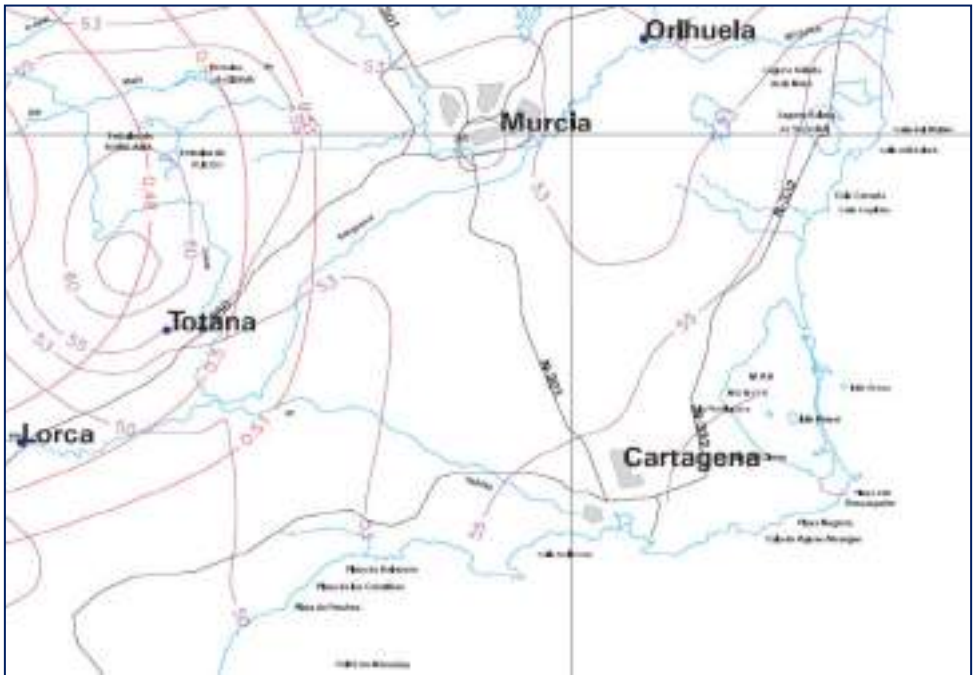


Figura 2. Isolineas de Pmed Cv para el área del Campo de Cartagena (MFO-1999).

Repitiendo los cálculos de la Instrucción 5.2.IC-2016 con estos nuevos datos de lluvia, los caudales punta de avenida resultantes correspondientes han sido Q_{100}=288 m^3/s ; Q_{500}=544 m^3/s, lo que supone incrementos del 30 y el 35% respectivamente respecto a los caudales anteriormente mostrados.

2.4. Conclusión

Aplicando la Instrucción vigente, y con las reservas y limitaciones de datos expuestas, los resultados del análisis realizado muestran que, en una cuenca tipo ficticia representativa del Campo de Cartagena, la consideración de las lluvias producidas en los últimos 20 años (y singularmente por las últimas DANAs de 2019 y 2016), dan lugar a un incremento del orden del 30-35% en los caudales máximos de diseño para T=100-500 años, sobre los obtenidos con anterioridad a estos episodios (aplicando MFO-1999).

Este incremento es debido exclusivamente al aumento de las lluvias máximas diarias, suponiendo constantes sus características de intensidad-duración-frecuencia.

3. ANÁLISIS DE CUENCAS REPRESENTATIVAS DEL SURESTE

Como un segundo análisis, adicional al anterior, se ha considerado la extensión territorial a un ámbito mayor que el del Campo de Cartagena, como es el del Segura, y se han empleado no solo una cuenca ficticia tipo sino 11 cuencas reales, con tamaños y características diferentes, y que se consideran como representativas de la zona.

El proceso desarrollado y los resultados obtenidos se describen seguidamente.

3.1. Lluvias máximas

Como se indicó en el caso de estudio anterior, la fuente estándar actual de referencia sobre lluvias extremas en España es el trabajo de MFO-1999, asumido en aplicaciones muy populares y de amplia utilización en estudios de inundaciones como CAUMAX.

Sin embargo, y como también se ha señalado, en los últimos años, con posterioridad a la publicación de ese trabajo, se han producido importantes episodios de precipitaciones intensas que podrían modificar las estimaciones anteriores, dejándolas del lado de la inseguridad.

En el caso mostrado representativo del Campo de Cartagena, para el análisis de lluvias se han empleado estaciones pluviométricas de la zona con los datos más actualizados, contrastándolos con los ofrecidos en MFO-1999.

Para este segundo caso no se utiliza el mapa de MFO-1999 sino que se han recalculado las estimaciones de lluvias máximas con dos colecciones de series distintas: una básica actual, que contempla todo el registro disponible hasta la actualidad, en las estaciones que han podido ser actualizadas, y otra histórica que es igual a la anterior pero dejando fuera los últimos 10 años, cuyo efecto se pretende evaluar. Este periodo cubre los recientes episodios singulares antes mencionados.

En el ámbito del sureste y la cuenca del Segura, y a los efectos de nuestro análisis, consideraremos que las lluvias máximas diarias para diferentes periodos de retorno son las resultantes de aplicar la distribución SQRT-ET max, recomendada oficialmente en MFO-1999 y que por el momento no se cuestiona, a las dos colecciones de series indicadas, hasta 2008 y hasta hoy, con los requisitos básicos de tener al menos un periodo común de 5 años (para evitar series muy cortas y no actuales), y tener una diferencia de longitud de al menos 5 años (para evitar series históricas interrumpidas y ya no activas).

Para el análisis realizado, dado su carácter preliminar y de primera aproximación, se han empleado las bases de datos de las que ya se dispone, con datos que no siempre incluyen el último año hidrológico en todas las estaciones, y sin realizar las actualizaciones y depuraciones que serían requeridas en un análisis hidrológico completo y de detalle.

Así, por ejemplo, considerando la DANA-2019, la inclusión de todos los datos de al menos este último año hidrológico aumentará sin duda la diferencia entre el periodo anterior y el actual. Tal análisis completo y de detalle puede realizarse a muy corto plazo si se comprueba que efectivamente puede haber un impacto estadístico de los últimos años que aconseje su revisión y puesta al día.

Una selección inicial de estaciones en la cuenca del Segura y su entorno, incluyendo las de AEMET y las de SIAR-SIAM, muestra un total de 492. Las estaciones SAIH tienen un registro corto y no están previamente homogeneizadas y depuradas, por lo que se ha optado por no considerarlas ahora, si bien debieran procesarse e incorporarse, una vez depuradas, en los posibles análisis futuros de detalle. En la figura se observa la ubicación de las estaciones consideradas, pudiendo comprobarse que su distribución espacial es razonablemente homogénea, su densidad elevada y, en definitiva, pueden proporcionar una descripción adecuada para los objetivos perseguidos en este primer análisis.

Con los filtros mencionados de longitudes mínimas el total finalmente resultante es de 229 estaciones cubriendo toda el área.

Realizadas las estimaciones estadísticas para las dos colecciones de datos, la tabla adjunta muestra los resultados medios representativos en ambos supuestos y para los dos periodos de retorno considerados, observándose que, en valores medios, se produce un incremento de lluvias máximas en las series actuales con respecto a las anteriores.

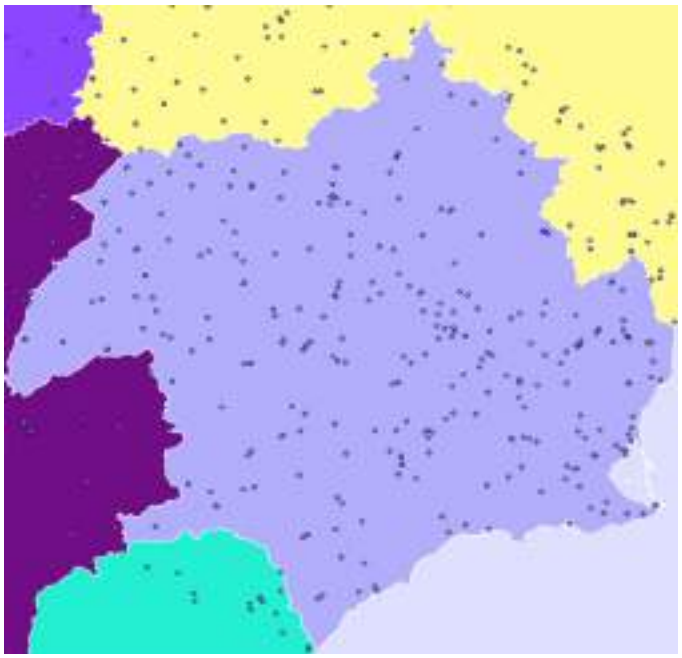


Figura 3. Estaciones identificadas de las redes AEMET y SIAR-SIAM en la demarcación hidrográfica del Segura y su entorno

Para mejorar la representatividad de los datos, las series actuales se han diferenciado en dos clases, aquellas con menor incremento medio respecto a la del periodo anterior y las de mayor incremento medio. Tal diferenciación es ciertamente muy simple, pero permite discriminar espacialmente al menos

en dos áreas, no con mayores o menores valores, sino con mayores o menores intensidades de cambio. Los resultados obtenidos son los de la tabla, que muestran incrementos medios representativos del 5 y 10% para T=100 años, y del 6 y 16% para T=500 años.

	Series hasta 2008		Series hasta 2019 (Δmen)		Series hasta 2019 (Δmay)	
	Media	D.Tip.	Media	D.Tip.	Media	D.Tip.
PR T=100	140	35	147	37	155	39
PR T=500	190	50	201	53	220	58

Tabla 2. Valores representativos de las lluvias máximas diarias (mm) para periodos de retorno de 100 y 500 años y para las series anteriores (hasta 2008) y actuales (hasta 2019).

Además de los cambios medios, o medias de los valores P_{100} y P_{500} en las distintas estaciones del pasado y en los dos grupos actuales considerados, la tabla muestra también las desviaciones típicas de los valores utilizados. Estas desviaciones dan una idea de la dispersión de los P_{100} y P_{500} en las diferentes estaciones, lo que no debe confundirse con las incertidumbres esperadas debidas a la estimación en una estación.

El mapa adjunto muestra, de manera muy simplificada, la existencia de variación territorial de lluvias máximas, con una zona costera con P_{100} mayores y otra de interior con menores valores.

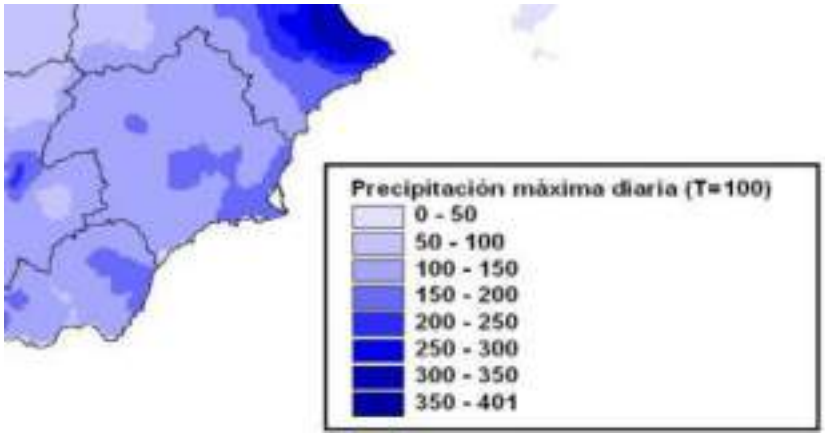


Figura 4. Valores de Pmax diaria para T=100 (entre 150 y 200 mm en toda el área).

La discriminación por incrementos mayores y menores no deja de ser simplificada, y los resultados medios obtenidos pueden obviamente enmascarar situaciones puntuales singulares como series con valores menores para la serie actual que la anterior, diferencias ocasionales en la fiabilidad de las redes de estaciones y sus longitudes de datos, o mayores heterogeneidades en la distribución espacial de los cambios.

Es muy posible que en determinadas áreas no haya ningún efecto de los últimos años sobre las lluvias máximas, o incluso que sea decreciente, mientras que en otras el efecto puede ser creciente y significativo. La tendencia clara observada en el Campo de Cartagena parece mantenerse en este ámbito mayor, pero de una forma mucho más difusa y con magnitudes medias inferiores.

Igual sucede con las curvas IDF, donde la variabilidad espacial puede ser también muy relevante. Como ya se indicó, todo ello debiera abordarse, en su caso, en posteriores análisis hidrológicos detallados, pero los resultados obtenidos en esta primera aproximación se suponen suficientemente indicativos de la situación existente.

3.2. Selección de cuencas

Para estimar los caudales máximos correspondientes a estas lluvias se ha seleccionado una colección de cuencas representativas de diferentes tamaños y condiciones, con datos reales tomados del listado de INUNMUR.

La figura adjunta muestra el mapa de INUNMUR con las cuencas de la región de Murcia allí consideradas como no reguladas, pudiendo observarse la diversidad de tamaños y dispersión de ubicaciones a lo largo de todo el territorio.

De entre todas ellas se han seleccionado 11, procurando que cubran la diversidad de áreas mostradas y se puedan considerar representativas de todo el conjunto.

A cada una de estas cuencas se aplicarán diferentes hipótesis de lluvias máximas y contrastes, tal y como se mostrará más adelante.

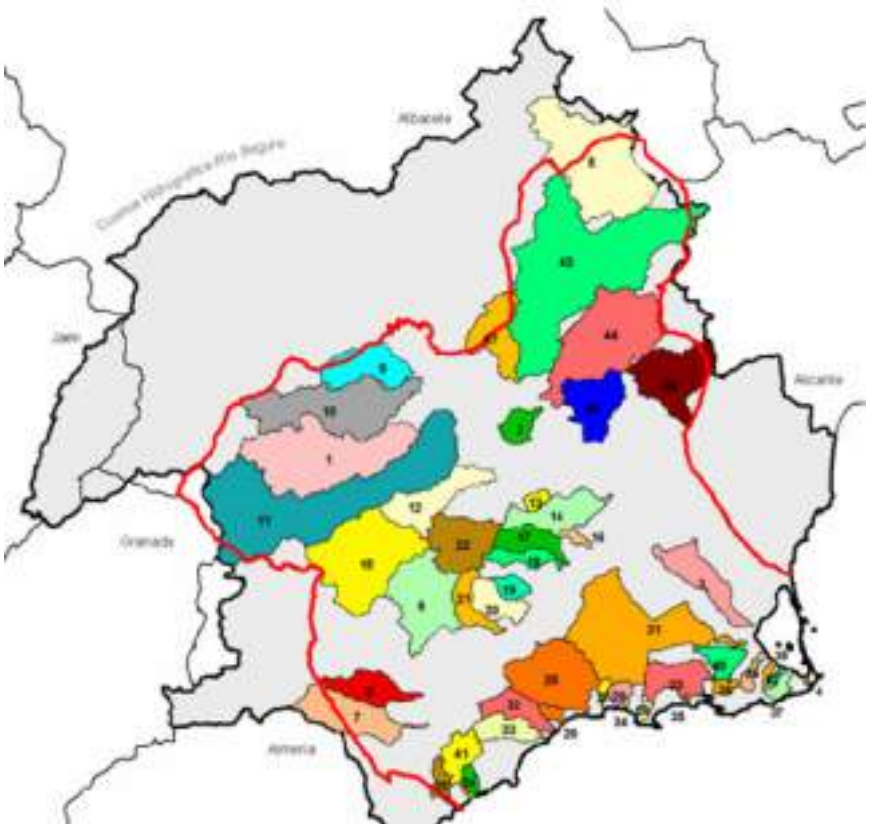


Figura 5. Cuencas de la región de Murcia identificadas en INUNMUR.

De entre las identificadas en INUNMUR, las cuencas representativas elegidas para los cálculos, y con datos reales tomados de INUNMUR, son las mostradas en la tabla, con una codificación secuencial propia, no coincidente con la mostrada en el mapa. Puede verse que las superficies oscilan entre 15’9 y 246 km^2 cubriendo regularmente todo este intervalo. Las pendientes del cauce son también variables entre el 0.97 y el 4.34%.

Cuenca	Area (km2)	Longitud (km)	Hmax (m)	Hmin (m)	Altura (km)	Pte. (%)
C01	246.0	33.1	1298	354	0.944	2.85
C02	205.0	28.8	1006	356	0.650	2.26
C03	152.2	18.6	1227	636	0.591	3.17
C04	106.2	27.6	1257	140	1.117	4.05
C05	79.6	20.7	795	531	0.264	1.27
C06	61.5	16.9	550	265	0.285	1.69
C07	47.9	13.7	377	244	0.133	0.97
C08	43.0	11.6	1026	524	0.502	4.34
C09	33.6	11.2	485	163	0.322	2.88
C10	21.7	5.8	386	258	0.128	2.21
C11	15.9	7.5	350	172	0.178	2.37

Tabla 3. Cuencas consideradas representativas para el análisis.

Para los umbrales de escorrentía de las cuencas, examinando la cartografía de tipos y usos de suelos, y siguiendo las recomendaciones de la Instrucción de drenaje, se ha seleccionado como representativo el intervalo de valores de P0 entre 15 y 35 mm, que cubre adecuadamente la mayoría de las situaciones presentes en el área.

3.3. Caudales máximos

Analizadas las dos colecciones de lluvias extremas según la fecha final de las series empleadas y para los dos periodos de retorno de 100 y 500 años, y elegido un conjunto de cuencas representativas para el análisis, a cada una de estas cuencas se han aplicado diferentes hipótesis de lluvias máximas, conforme a los valores para periodos de retorno indicados, en los supuestos actual y anterior, y considerando distintos valores de lluvia posibles, 5 en cada caso, obtenidos a partir de la desviación típica de los valores para cada caso y periodo de retorno. Asimismo, se han supuesto dos posibilidades de umbral de escorrentía, que se aplicarán también a todas las combinaciones de lluvias y cuencas resultantes.

Con todo ello, se genera un extenso y variado conjunto de casos posibles, a cada uno de los cuales se ha aplicado el método racional para el cálculo de caudales máximos, conforme a los criterios y métodos propuestos por el CEDEX y formalmente establecidos en la Instrucción de drenaje.

Tras estos cálculos, el resultado final es un ensemble de numerosos supuestos combinados de cuencas, lluvias, escorrentías y caudales máximos resultantes, que se considera suficientemente indicativo de la situación existente y permite la comparación de caudales calculados conforme a las series actuales y a las series anteriores, sin los últimos años, evaluando así el posible impacto de su consideración.

En definitiva, la ejecución de los cálculos para las 11 cuencas de diferentes tamaños entre 16 y 246 km^2, aplicando los dos periodos de retorno de 100 y 500 años, y para cada uno de ellos 5 supuestos de lluvias máximas distribuidos conforme al valor esperado y la desviación típica de la estimación de lluvias máximas, y a su vez dos hipótesis de umbral de escorrentía, arroja los resultados mostrados en el gráfico, en el que cada punto es un cálculo de la relación entre la estimación actual de caudal máximo con los datos más recientes disponibles, y la misma estimación pero con los datos anteriores, y corresponde a una de las simulaciones apuntadas. El valor 1 significaría ningún efecto y valores mayores significan efectos mayores.

Para el periodo de retorno de 100 años, el número de simulaciones realizado es de 220, resultante de las 11 cuencas x 5 hip.de lluvias x 2 hipótesis de umbral de escorrentía x 2 supuestos de lluvias máximas (menores y mayores).

Para tener una impresión visual de todo el conjunto correspondiente a T=100, se han situado consecutivamente los resultados de las 11 cuencas, a cada una de las cuales corresponde una banda vertical separada (datos hasta el 60, 61-120, 121-180, etc.). El orden de las cuencas es el c01, c02, …, es decir, de mayor a menor superficie.

Examinando el gráfico con la secuencia de casos, se observa que las diferencias entre cuencas son muy pequeñas, y todas tienen una respuesta muy parecida. Hay una ligera tendencia decreciente con la superficie, pero muy poco significativa y despreciable en la práctica.

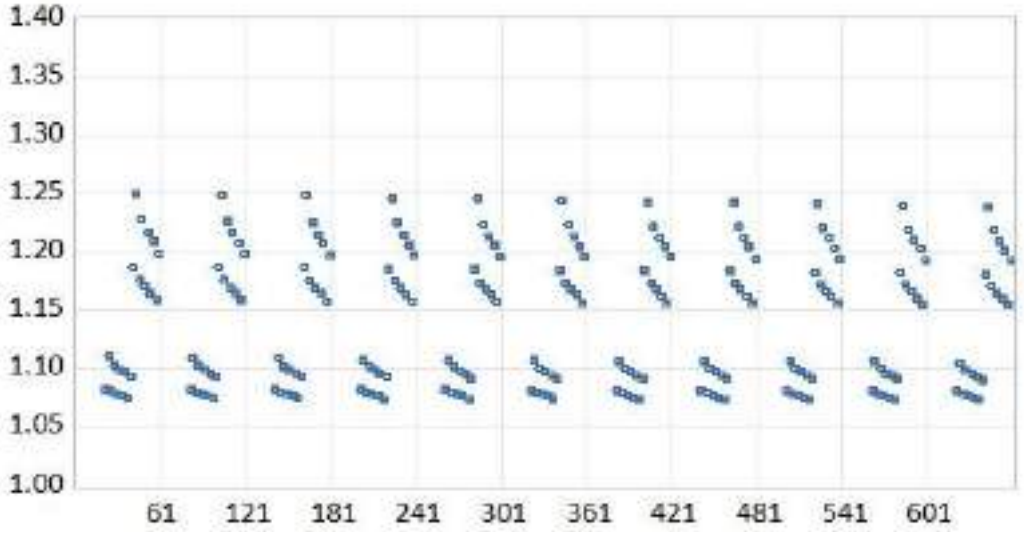


Figura 6. Relaciones entre caudales máximos para T=100.

Para cada una de las cuencas el patrón de respuestas es similar y presenta 4 grupos diferenciados, cada uno de ellos con 5 valores. Los 5 valores de cada grupo corresponden a los 5 valores simulados de P100 a partir de su desviación típica. Los dos grupos inferiores corresponden al supuesto de estaciones con P100 menores, mientras que los dos grupos superiores corresponden al supuesto de estaciones con P100 mayores. Ambos supuestos reflejan simplificadamente, como se apuntó, la variedad de lluvias extremas en distintas zonas del territorio analizado.

A su vez, dentro del grupo inferior, el grupo con valores más reducidos corresponde a los umbrales de escorrentía mayores (30 mm) mientras el de valores más elevados corresponde a los umbrales de escorrentía menores (15 mm). Se observa en todo caso que, como cabría esperar, el factor determinante es el supuesto de P100 mayor o menor, que separa los ratios de caudal en valores entre 1.07 y 1.12, o entre 1.15 y 1.25.
Para un supuesto de P100 dado, el umbral de escorrentía es también relativamente importante, aunque en un grado inferior, pues separa en subgrupos diferenciables, en torno a 1.07-1.08, 1.08-1.11, y 1.15-1.19, 1.19-1.25. Para un supuesto de P100 dado, y un umbral de escorrentía también fijado, las diferencias debidas a la variabilidad del P100 es también significativa, aunque en menor grado que las anteriores.

Sin duda el factor que menos influye es el tamaño de la cuenca, que parece reproducirse de forma similar en los 11 casos considerados sin diferencias entre ellos. En síntesis, la media global de los 220

casos estudiados es de un aumento de caudales del 14%, que oscila entre un mínimo del 7% y un máximo del 25% (coeficientes 1.14, 1.07 y 1.25 respectivamente).

Repitiendo el proceso anterior, pero partiendo ahora de las estimaciones de lluvias para el periodo de retorno de 500 años, los resultados de la secuencia de casos son los mostrados en la figura, similar a la anterior de 100 años.

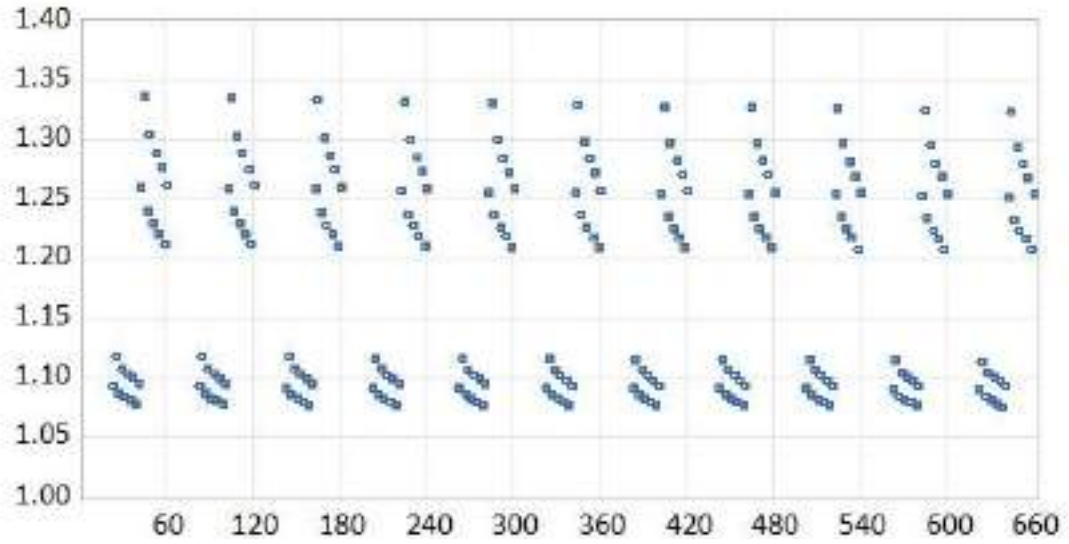


Figura 7. Relaciones entre caudales máximos para T=500.

Como se observa, la apariencia general de estos resultados de las nuevas simulaciones con P500 es muy parecida a la del P100, aunque con magnitudes ligeramente diferentes, algo más elevadas.
Ahora la media global de los 220 casos estudiados es de un aumento de los caudales máximos del 18%, que oscila entre un mínimo del 7% y un máximo del 33%.

En definitiva, y con las salvedades expuestas, para T=100 se obtienen incrementos del caudal máximo del orden del 14%, mientras que para T=500 el incremento es del 18%.

Como ya se señaló, estos valores medios ocultan heterogeneidades espaciales y han de contemplarse con la debida cautela, pero apuntan en todo caso, al margen de su magnitud concreta, a un esperable aumento de los caudales máximos de diseño por la mera incorporación al cálculo de los datos más recientes de lluvias extremas, al menos en algunos sectores del área estudiada.

4. ANÁLISIS DE LLUVIAS MÁXIMAS DE LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS

Para completar los análisis de caudales máximos mostrados en los epígrafes anteriores, se ha realizado una indagación sobre el efecto que tiene sobre los estadísticos de lluvias máximas la consideración o no de los últimos 20 años de las series, que son aproximadamente los transcurridos desde la última publicación oficial de MFO-1999.

El método seguido ha sido partir de la base de datos ya anteriormente comentada, con las limitaciones y criterios expuestos, y estimar la distribución SQRT-ET max para todas las series de máximos anuales disponibles. Estimadas las distribuciones se calculan los valores de lluvia diaria P100, que es la correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.

Seguidamente se suprimen los últimos 20 años de las series, dejando como fecha final la de 1999, y con esta base filtrada se repite el mismo proceso.

Finalmente se dividen los P100 de la base completa (series largas) por los P100 de la base reducida (series cortas), obteniéndose los resultados mostrados en la figura, en la que cada punto es el cociente correspondiente a una estación, y han sido filtrados con los criterios de longitud mínima de la serie corta de al menos 20 años y parámetros de la distribución dentro de límites admisibles.

Puede verse que los valores oscilan en torno a 1, pero sin que se aprecie un claro dominio de los mayores a 1, siendo incluso más los que muestran cocientes menores a la unidad (el valor medio global es 0'97). Ello significa que, en contra de lo que cabría esperar, no hay evidencia clara de que la consideración de las series largas, con los últimos 20 años, conduzca a valores de lluvias P100 mayores que los obtenidos con las series cortas.

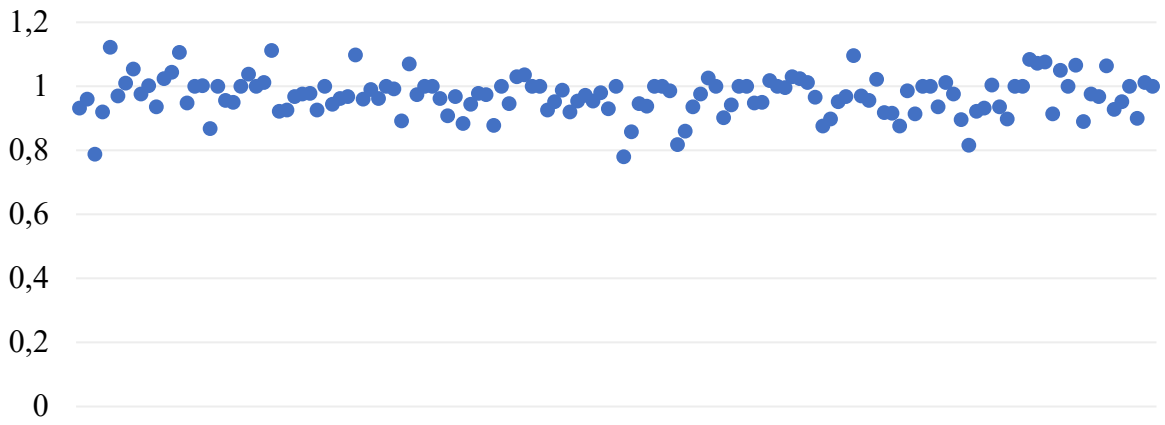


Figura 8. Relaciones entre caudales máximos para T=100.

Este interesante resultado ha de contemplarse con la debida cautela dadas las limitaciones de los datos ya señaladas, pero aún con ello advierte que el efecto de los últimos 10 años, que resultaría apreciable a la luz de los análisis anteriores, parece diluirse si se retrocede aún más en el tiempo, como si un pasado más lejano, décadas atrás, hubiera supuesto valores mayores que compensarían la supresión de los extremos de los últimos años. Otra posible explicación, concurrente con la anterior, es la de heterogeneidades espaciales en el impacto de los últimos años, que podrían diferir según los territorios. Se trata de una cuestión de indudable interés cuyo estudio detallado sugerimos y que, por ahora, nos limitamos a apuntar.

Solo como un tanteo previo al problema, se plantea el breve análisis que se muestra a continuación.

5. ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LAS LLUVIAS EXTREMAS

Para indagar en el interesante y no esperado efecto observado en el análisis anterior, se ha procedido a estimar la evolución de las lluvias máximas en la zona, con la metodología y resultados que siguen.

Para ello se ha seleccionado un indicador representativo de estas lluvias máximas diarias como es el P100 (valor correspondiente al periodo de retorno T=100 años), analizando su evolución temporal al ser evaluado para una ventana temporal móvil y de longitud constante. La longitud constante permite eliminar el efecto de la incertidumbre variable, dependiente de la longitud de la serie, y las iguala a todas posibilitando así una mejor comparación relativa.

Si además las ventanas son síncronas para todas las estaciones, con las mismas fechas de inicio y final, entonces pueden apreciarse también posibles efectos decadales o plurianuales de interés regional. Subsiste el problema de que en la ventana puede haber un número de ausentes variable, pero esto puede paliarse descartando aquellas que superen un número de ausentes dado.

Metodológicamente, para cada estación se han ido extrayendo ventanas temporales comenzando en el año 1905 hasta el 1990, de 5 en 5 años, y todas con longitud de 30 años. El total de ventanas así elegidas es de 18, estimándose para cada una sus parámetros de la distribución SQRT-ET max y su valor correspondiente de P100. El proceso se realiza para todas las estaciones disponibles.

El resultado final es una colección de series temporales con a lo sumo 18 valores cada una, que muestran las tendencias en los P100 estimados, lo que permite apreciar visualmente si hay tendencias o derivas en estos valores, y sus órdenes de magnitud relativos.

La figura adjunta muestra 8 colecciones de series representativas de la totalidad de las estaciones analizadas. La primera impresión visual es la de que no hay un patrón nítidamente marcado que apunte tendencias crecientes o decrecientes del P100 con el paso del tiempo. Hay estaciones donde sí que se observa esta tendencia creciente, pero hay otras en las que la tendencia es manifiestamente la contraria.

Al realizar los cómputos se ha comprobado que son numerosos los años de los que no hay dato de lluvia máxima por tener un número de ausentes que impide su extracción suficientemente fiable, de forma que hay muchas ventanas con series que no alcanzan la longitud nominal de 30 años.

Esta circunstancia distorsiona los resultados en alguna medida. Para paliar la distorsión cabría realizar una depuración y completado previo de las series, hasta donde sea posible, y añadir intervalos de confianza a las estimaciones de P100 para ver sus horquillas de incertidumbre.

Las irregularidades de los alambres pueden asimismo suavizarse tomando ventanas de mayor tamaño, y con orígenes móviles de año en año, no quinquenales como los mostrados.

Todo ello son mejoras que se propone llevar a cabo, junto con la investigación de la evolución no solo del P100, sino de los parámetros de las distribuciones, que son datos previos ya disponibles, calculados para llegar finalmente al P100.

No se ofrece esta evolución de parámetros por proporcionar resultados carentes de un patrón claro y generalizado, como sucede con el P100.

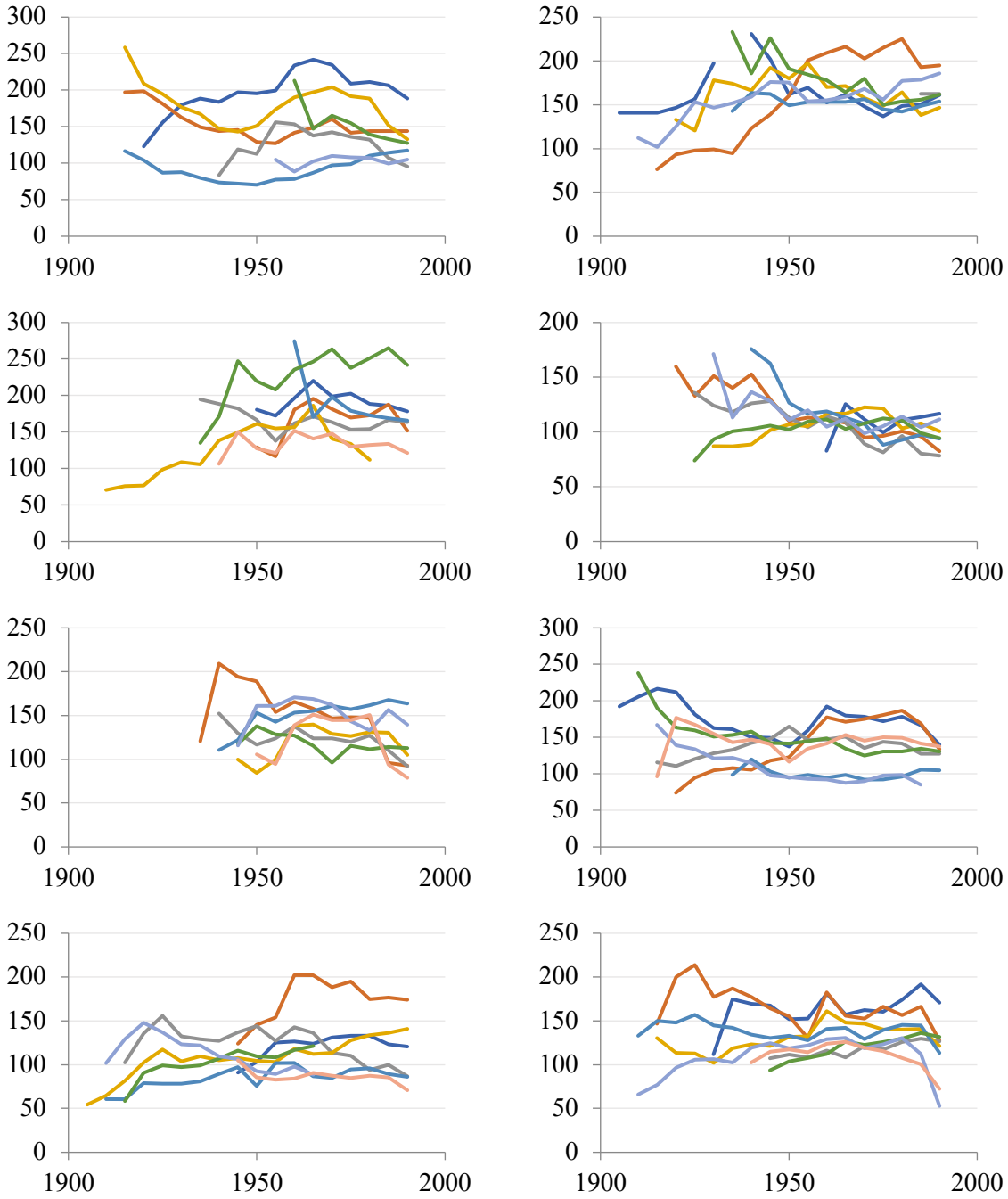


Figura 9. Evolución de las lluvias máximas P100 en ventanas móviles.

Las mejoras sugeridas en los datos pueden permitir análisis más robustos que los hoy disponibles, dilucidando el patrón espacio-temporal de las tendencias de los parámetros de las distribuciones y de los indicadores deseados, como se ha mostrado con el P100.

Si se confirmasen tales tendencias ello daría pie a un análisis no estacionario del problema hidrológico de los caudales de inundación, problema del mayor interés teórico y práctico a la vista de los episodios observados en los últimos años, y de las amenazas del cambio climático, que apuntan precisamente a una intensificación de estos extremos.

Como consecuencia de este creciente interés por el problema, la teoría de distribuciones de variables aleatorias no estacionarias se ha desarrollado ampliamente en los últimos años, usualmente

considerando que alguno de sus parámetros es covariable con el tiempo mediante una relación en general lineal o linealizable mediante alguna transformación. Con ello se puede construir una función de verosimilitud extendida en la que a los parámetros usuales de la distribución se añaden los que describen su evolución temporal. La estimación se lleva a cabo de la forma usual, maximizando numéricamente esta nueva verosimilitud.

Una forma muy común para variables extremas como las lluvias o caudales máximos es emplear la distribución GEV y suponer que su parámetro de forma, variable y de difícil estimación, es constante para la estación y área, mientras que el de posición, y en ocasiones el de escala, pueden variar con el tiempo.
Ante los resultados de comportamiento incierto obtenidos en nuestro caso, no hemos abordado por ahora este tipo de trabajos, que deberán desarrollarse en tanto en cuanto se disponga de información más robusta, homogénea y contrastada.

Asimismo, si se admite la no estacionariedad de las variables el concepto convencional de periodo de retorno deja de tener sentido y debe ser revisado. Se han propuesto diferentes aproximaciones para esta reconsideración, aunque sin experiencia aún de su funcionamiento práctico.
Pese a la relativa complejidad de estas nuevas técnicas, puede afirmarse que el principal problema actual no es el de la computación, sino el relacionado con la disponibilidad de datos suficientemente completos y fiables.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Como síntesis de cuanto se ha expuesto, cabe apuntar los siguientes resultados y conclusiones.

1. Los nuevos datos disponibles de los episodios lluviosos de 2016 y 2019 registrados en el sureste peninsular, son de tal magnitud relativa que podrían influir apreciablemente en la estimación de parámetros de la distribución estadística de lluvias máximas diarias y, en consecuencia, en la evaluación de caudales de avenida resultantes de aplicar la normativa vigente. Estos caudales podrían haber quedado del lado de la inseguridad. Mediante cuatro experimentos numéricos simplificados, pero suficientemente indicativos, se ha procedido a comprobar esta hipótesis, obteniéndose los siguientes resultados y conclusiones.
2. El análisis realizado ha constado de dos partes, una primera relativa a los caudales de crecida, y una segunda relativa las lluvias máximas. A su vez, la primera parte se ha abordado mediante dos análisis complementarios, el primer caso analizando una cuenca tipo del Campo de Cartagena vertiente al Mar Menor, y el segundo analizando un conjunto de 11 cuencas reales de distintos tamaños y representativas de la región del sureste. La segunda parte se ha abordado mediante otros dos análisis, tercer y cuarto casos, relativos a las series anuales de lluvias máximas diarias.
3. En el primer caso se ha aplicado la instrucción 5.2.IC-2016 con los datos de lluvias de MFO-1999 y con las series actualizadas hasta hoy, contrastando ambos. En el segundo se ha aplicado un ensemble de la aplicación del método racional, en la versión CEH, repitiendo estos cálculos para todas las cuencas con y sin los datos de lluvias de los últimos 10 años (series hasta 2018-2019, y series hasta 2008). Para el tercer caso se han adoptado las series actuales y las de 20 años atrás (hasta 1999). Para el cuarto caso se han adoptado las series actuales, pero en ventanas móviles de 30 años desde la 1905-1935 hasta hoy, 1990-2020.
4. Puede comprobarse que en la cuenca tipo del primer caso, y a igualdad del resto de condiciones, el incremento de caudales máximos para periodos de retorno de 100 y 500 años es significativo, con valores del orden de un 30, 35% respectivamente superiores a los previos. Para las cuencas representativas se observan también incrementos de caudales máximos con valores medios del 14 y 18% respectivamente. Estos valores medios ocultan heterogeneidades espaciales y de datos

por lo que han de contemplarse con la debida cautela, pero apuntan en todo caso, al margen de su magnitud concreta, a un esperable aumento de los caudales máximos de diseño por la mera incorporación al cálculo de los datos más recientes de lluvias extremas (10 años), al menos en algunos sectores del área estudiada. Existe por tanto fundamento técnico suficiente para llamar la atención sobre este problema y recomendar su consideración formal por las autoridades competentes.

5. Entre las hipótesis admitidas en los cálculos realizados está la del mantenimiento de las curvas intensidad-duración-frecuencia de tormentas propuestas en MFO-1999 y procedentes de estudios anteriores. Las extraordinariamente elevadas intensidades observadas en la DANA-2019 permiten cuestionar la validez de este supuesto y aconsejan también una revisión de estas curvas, fundamentales para la estimación de los caudales de diseño. La intensificación de las curvas IDF aumentaría aún más esos caudales de diseño. Para la revisión de estas curvas, tarea rápida y técnicamente sencilla, podrían emplearse los datos de tormentas de alta resolución generados por las redes SAIH, SIAR-SIAM y AEMET.
6. Puesto que los episodios de DANA son de alcance regional, más allá de la comarca del Campo de Cartagena y de la propia zona del sureste, puede suponerse estos resultados son aplicables a un ámbito territorial mayor, y debieran generalizarse desde luego a toda la Región de Murcia-Alicante-Almería y, por extensión, a toda la demarcación del Segura y su cobertura, sin perjuicio de una necesaria revisión para todo el país. Áreas como las del Júcar o el Sur han experimentado situaciones similares y previsiblemente tendrán el mismo problema.
7. Los caudales de diseño hoy empleados para el dimensionamiento de presas y encauzamientos previstos en el vigente Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de 2015 en la demarcación del Segura podrían verse afectados por la situación expuesta. Es el caso de las presas de Las Moreras, Lébor, Nogalte, Béjar, Tabala, Arroyo Grande, La Torrecilla o diversos encauzamientos, cuyo dimensionamiento y funcionalidad pueden verse afectados por estos cambios. Dado que ese Plan se encuentra en proceso de revisión, en ésta debieran tenerse en cuenta las circunstancias señaladas.
8. Los mapas hoy vigentes del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables han quedado previsiblemente obsoletos, al menos en esta área geográfica del sureste peninsular, y las áreas inundables derivadas (T=100, T=500) no son las que hoy se obtendrían empleando los mismos procedimientos técnicos, pero incluyendo los nuevos datos hidrológicos disponibles. Esto puede tener importantes consecuencias técnico-jurídicas en el diseño de alternativas de defensa y en la ordenación territorial.
9. Los resultados de incremento de lluvias máximas obtenidos considerando los últimos 10 años no parecen confirmarse claramente si se retrocede más en el tiempo. Los casos estudiados tercero y cuarto, sobre evolución de las lluvias máximas diarias, no muestran resultados concluyentes, lo que puede deberse tanto al fenómeno en si como a deficiencias de los datos (registros incompletos, datos últimos no siempre incluidos para todas las estaciones, etc.) o a fenómenos velados de heterogeneidad espacial. Con los datos de que se ha dispuesto, la hipótesis de no estacionariedad de las lluvias máximas diarias no puede confirmarse ni rechazarse de forma taxativa.
10. Pese a que no pueda hoy confirmarse de forma fehaciente esta hipótesis, la posible no estacionariedad de los registros hidrológicos de valores extremos -derivada o no del cambio climático- debe tenerse en cuenta precautoriamente en la planificación de zonas inundables, y ello podría requerir una reconsideración y adaptación no solo de los datos sino también de las metodologías en uso. Conceptos tradicionales y bien asentados como el de periodo de retorno dejarían de tener sentido y habrían de ser reinterpretados.
11. Sin perjuicio de una primera actualización urgente de la información estadística sobre precipitaciones extremas en el área del sureste peninsular, contrastadamente azotada por estos fenómenos, se recomienda abordar un estudio detallado y sistemático de esta situación, a escala nacional, que proporcione conclusiones firmes y permita proponer criterios estables,

homogéneos y bien fundamentados sobre el problema. La revisión podría iniciarse de forma inmediata en la mencionada zona, especialmente afectada, y debiera considerar tanto las distribuciones regionales de lluvias máximas diarias como las relaciones intensidad-duración-frecuencia de tormentas aplicables en la zona, y todo ello considerando la posible no estacionariedad de las variables involucradas.

12. Dado que con motivo de la DANA-2019 y otros recientes episodios similares se ha planteado reconsiderar diferentes infraestructuras de defensa contra inundaciones, movilizando inversiones que pueden ser considerables, se recomienda en todo caso reevaluar los análisis hidrológicos y redimensionar estas infraestructuras conforme a los nuevos datos estadísticos y criterios indicados, introduciendo ya los elementos cautelares necesarios, sin necesidad de esperar a un nuevo ciclo de revisión completa de los PGRI a escala de todo el país.

EL EFECTO LAMINADOR DE LOS EMBALSES DURANTE LAS AVENIDAS

Luis Garrote de Marcos
Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid, España
l.garrote@upm.es
https://orcid.org/0000-0001-9087-3638

Paola Bianucci
Aquatec, España
pbianucci@aquatec.es
https://orcid.org/ 0000-0001-7297-1082

RESUMEN

En esta ponencia se discuten algunos aspectos relacionados con la laminación de avenidas en los embalses. Se analizan los condicionantes del problema, se formulan los objetivos de la gestión y se describen los métodos de cálculo más habituales. Como ejemplo, se plantea la comparación de dos métodos de laminación en el embalse de Talave, en la cuenca del Segura. Dado el carácter estocástico de las variables involucradas, en este trabajo se plantea la utilización de técnicas de análisis probabilístico para evaluar el comportamiento de diferentes modelos de gestión de embalses. Esto permite realizar la evaluación del comportamiento de diferentes modelos de gestión del embalse durante la crecida frente a un amplio rango de solicitaciones hidrológicas. También se puede realizar un análisis de sensibilidad de algunas variables (como por ejemplo el nivel inicial en el embalse), de modo que el responsable de explotación pueda evaluar su influencia en el resultado final.

1. COMPORTAMIENTO DE LOS EMBALSES EN AVENIDAS

El comportamiento de un embalse en avenidas está influido por una serie de condicionantes, que es necesario conocer para planificar su gestión. Los condicionantes son los datos del problema que se plantea durante una crecida. La solución consiste en la gestión que debe hacerse del embalse para conseguir minimizar los riesgos y daños y maximizar el volumen de agua disponible en el embalse al final de la avenida.

Un grupo de condicionantes puede conocerse con antelación, puesto que tienen carácter permanente. Estos deben centrar la atención del responsable de explotación a la hora de planificar su actuación durante la crecida. El otro grupo incluye los condicionantes de la situación inicial al comienzo de la avenida y de la avenida propiamente dicha, que varían de un episodio a otro. Los procedimientos de toma de decisiones deben ser flexibles para poder adaptarse a cualquier combinación de factores que razonablemente pueda presentarse en un caso real.

Tanto los modelos de gestión como de optimización están influenciados por estos condicionantes, y serán tenidos en cuenta tanto para el diseño de los mismos como para la evaluación de su funcionamiento. A continuación, se caracterizan los principales diferenciando entre aquellos que son permanentes (afectan a todas las operaciones de gestión) y aquellos circunstanciales (afectan a una situación concreta y cambian de una avenida a otra).

1.1. Condiciones permanentes

Las condiciones permanentes son los factores que afectan a todas las operaciones de gestión, independientes de las circunstancias de un caso concreto. Su conocimiento es imprescindible para realizar una explotación correcta del embalse, y deben invertirse los recursos necesarios para evaluarlos con la máxima precisión, especialmente con ocasión de la redacción de las normas de explotación en avenidas. A continuación, se enumeran los principales:

a) *La cuenca hidrológica*: Hay numerosos factores que caracterizan la cuenca hidrológica y que tienen incidencia en la generación de avenidas: la superficie, la situación y orientación, el terreno, la vegetación, la red de drenaje, la meteorología, etc. Todos estos factores se traducen en dos propiedades fundamentales: la capacidad para generar escorrentía y la tendencia a propagarla hasta el embalse. La estimación cuantitativa de estas propiedades requiere la realización de los pertinentes estudios hidrológicos, que deben combinar adecuadamente criterios de tipo físico, mediante un análisis de las características geomorfológicas, con datos estadísticos, mediante un estudio de precipitaciones y caudales registrados en la cuenca.

   En la mejor situación, un conocimiento perfecto de la cuenca hidrológica se traduce en un modelo de lluvia-escorrentía. Mediante el modelo se pueden hacer previsiones de presentación de caudales en el tiempo en función de la lluvia registrada y prevista en la cuenca. Estos modelos permiten ganar tiempo en el proceso de toma de decisiones, anticipando las situaciones a las que nos enfrentaremos en el futuro.

b) *El cauce del río*: El cauce del río condiciona la gestión de la presa porque tiene una capacidad de desagüe limitada. La parte más importante es la situada aguas abajo, que recibe los vertidos de la presa. A veces también condiciona el tramo de cauce inmediatamente anterior, por efecto del remanso de agua en la cola del embalse. Para tener en cuenta su influencia conviene conocer la hidráulica del cauce lo mejor posible, realizando los estudios complementarios que sean necesarios.

   El conocimiento del cauce del río se resume en una curva de daños esperados en las riberas en función del caudal desaguado en la presa. Normalmente la curva no se puede definir con precisión, por dos motivos. En primer lugar, el régimen variable hace que la relación caudal-nivel no sea única. En segundo lugar, aunque se conozca el nivel alcanzado por las aguas, la estimación de daños y su valoración económica es tremendamente difícil. Como máximo se suele llegar a caracterizar el cauce mediante un número reducido de caudales que suponen daños cada vez más cuantiosos. Por ejemplo, un nivel de afecciones leves, daños moderados, fuertes y catastróficos.

c) *El embalse*: El embalse se utiliza para retener la avenida, por lo que el volumen disponible es un condicionante esencial. El aspecto que interesa es la superficie inundada a distintas cotas, puesto que esta variable define el volumen de agua debe entrar en el embalse para que se incremente el nivel en una unidad, aumentando en consecuencia los caudales desaguados. A mayor superficie inundada mayor efecto de laminación.

   El conocimiento del embalse se traduce en la curva característica o batimétrica de embalse, que representa la superficie inundada y el volumen embalsado en función de la cota de agua en el embalse. Esta curva suele conocerse con bastante precisión, a partir de la cartografía del vaso del embalse realizada durante el proyecto de la presa. Si los aterramientos son importantes, la capacidad del embalse puede variar. Si el volumen de

embalse es grande comparado con el de aterramientos, esta circunstancia afecta poco a la laminación, ya que los sedimentos se suelen acumular en la parte baja del embalse. Además, la variación de la capacidad del embalse en el tiempo es muy lenta.

En el proyecto y en las normas de explotación del embalse se establecen una serie de niveles entre los cuales se definen zonas que se asignan a fines determinados.

d) *El sistema hidráulico de la presa*: La capacidad de los órganos de desagüe de la presa influye decisivamente en la gestión de la avenida. Cuanto menor sea la capacidad de evacuación mayor es el efecto de laminación que se consigue, puesto que el nivel de agua en el embalse sube rápidamente. La capacidad de desagüe se expresa en función de la cota de agua en el embalse y en función del grado de apertura de los órganos de desagüe. Se traduce en un conjunto de curvas (una por cada órgano de desagüe) que relacionan el caudal desaguado, la cota de agua en el embalse y el estado del órgano de desagüe. En la práctica existen también grandes dificultades para evaluar la capacidad de evacuación de cada órgano de desagüe. Suelen utilizarse curvas teóricas o, en el mejor de los casos, ensayos en modelo reducido, que no pueden tener en cuenta incidencias originadas por defectos de construcción o por el natural envejecimiento de las instalaciones. Para obtener los valores verdaderos es necesario hacer ensayos a escala real, lo que provoca desperdicio de agua y, posiblemente, daños en el cauce.

e) *La sociedad*: La sociedad es un término genérico que engloba la estructura de responsabilidad del organismo encargado de la gestión y las normas legales que son de aplicación. Estos factores condicionan la explotación del embalse durante una avenida. Dentro de la cadena de mando, las decisiones de operación del embalse en avenidas corresponden al responsable de explotación, que sólo está sometido a las restricciones que surgen de su responsabilidad legal. Normalmente el sistema de información que le servirá de base para la toma de decisiones será responsabilidad de otra persona, que actuará como asesor, posiblemente desde un emplazamiento alejado de la presa. El sistema de información, además, difunde datos sobre la situación en la cuenca y el embalse a otros técnicos de la organización, que pueden también participar en la toma de decisiones. Finalmente, los gestores de otros ámbitos de responsabilidad, como Protección Civil, deben ser informados de las decisiones que les afecten. El efecto conjunto de la sociedad (organización, normas, jurisprudencia) se traduce en una serie de restricciones que limitan la capacidad de maniobra y pueden desviar la explotación del óptimo técnico. Entre estos factores destaca la necesidad de dar conocimiento a las autoridades de los desembalses que se vayan a realizar con anticipación suficiente para poder alertar a la población. La jurisprudencia sobre responsabilidad civil es también importante, puesto que aconseja no desaguar en ningún caso más caudal del que está entrando para evitar condenas por daños.

También es importante la normativa legal sobre seguridad. Todos estos factores de tipo organizativo y social deben conocerse perfectamente de antemano, y tener previstas las medidas a adoptar en cada caso.

1.2. Condiciones circunstanciales

Los condicionantes circunstanciales son los que afectan a una situación concreta. Estos condicionantes cambian de una avenida a otra y son los que caracterizan el problema al que nos enfrentamos.

a) *La avenida*: La avenida es el condicionante fundamental de la operación del embalse. La avenida se describe mediante una serie de magnitudes físicas (volumen, caudal punta,

duración, forma de la distribución en el tiempo) que permiten caracterizarla. En términos abreviados, suele hablarse del periodo de retorno asociado a una crecida, en función del análisis probabilístico de alguna de estas características (normalmente el caudal punta) o una combinación de ellas.
Desde el punto de vista de la operación del embalse, la variable aleatoria más significativa para asociar un periodo de retorno a una avenida es la máxima elevación de lámina de agua en el embalse con un criterio de explotación determinado. El conocimiento de la avenida se manifiesta en un hidrograma de caudales de entrada al embalse. La parte correspondiente al pasado se puede conocer a partir de la evolución del nivel de agua en el embalse y el caudal desaguado. El conocimiento de la parte correspondiente al futuro requiere un sistema de información más amplio, con aforos en estaciones aguas arriba del embalse, pluviómetros y modelos de generación de escorrentía y propagación de ondas de avenida. Aun así, la estimación de la rama futura del hidrograma suele tener una gran incertidumbre, especialmente a largo plazo, cuando el efecto de la lluvia futura pasa a dominar el hidrograma.

b) *La cota inicial*: El embalse se utiliza para retener la avenida, por lo que el volumen disponible es un condicionante esencial. El volumen disponible para la laminación en un instante dado se denomina resguardo. Este es un término equívoco, ya que se utiliza en varios contextos con significado diferente. En el contexto de laminación de avenidas, se pueden distinguir dos resguardos: el resguardo de explotación y el resguardo de proyecto. El resguardo de explotación se definió como la distancia entre la cota de agua en el embalse y el máximo nivel normal de explotación (NMN). Este resguardo marca el volumen de embalse disponible para el control de la avenida. El resguardo de proyecto es el volumen disponible entre la cota de agua en el embalse para los niveles de proyecto de la presa (NMN y nivel de avenida de proyecto (NAP)) y el máximo nivel de agua en el embalse para el que la presa se considera segura. El nivel máximo de explotación (NEX) admisible para garantizar la seguridad de la presa es una cota que varía en función de la época del año, y se fija en las normas de explotación de la presa.

c) *El estado de la presa*: El estado de la presa y los órganos de desagüe pueden modificar las operaciones de laminación planificadas de antemano y limitar la capacidad de maniobra del encargado de la explotación de la presa. Las averías en el cuerpo de presa, como grietas o filtraciones, pueden aconsejar mantener la cota de agua en el embalse por debajo de un valor máximo. También pueden existir periodos en los que algún órgano de desagüe no esté operativo, bien por estar efectuando operaciones de mantenimiento o reparación o por sufrir averías imprevistas, como fallo en el suministro eléctrico o en los sistemas de accionamiento.

d) *La información disponible*: La toma de decisiones de explotación depende de la información disponible en cada momento. Todas las presas disponen de un sistema de información para que la cadena de mando pueda tomar las decisiones adecuadas. Sin embargo, en un caso concreto, la información disponible puede ser muy variable, dependiendo de numerosos factores, como la hora del día, la época del año, la existencia de una alerta meteorológica anterior, el estado de las comunicaciones, el personal disponible, la colaboración con otros organismos, etc. La cantidad y calidad de la información de que disponen los responsables es un parámetro fundamental para la toma de decisiones. El enfoque de la explotación deberá adecuarse a ello, siendo más conservador cuanto peor sea la información disponible.

2. OBJETIVOS DE LA GESTIÓN

Los objetivos de la gestión son un aspecto clave de la operación de un embalse. En situación normal los embalses se explotan para garantizar el suministro a la demanda, manteniendo los niveles dentro de los márgenes admisibles por condiciones de explotación o seguridad. En una situación extraordinaria de crecida los objetivos son más cambiantes, dependiendo de la magnitud de la crecida y la gravedad de la situación. En una primera aproximación, pueden clasificarse en cuatro grupos, ordenados según su importancia:

1. Protección de la presa
2. Protección del cauce
3. Conservación del agua embalsada
4. Recuperación del resguardo

Estos objetivos pueden ser incompatibles entre sí, por lo que debe establecerse un orden de prioridades en caso de conflicto. La situación es compleja fundamentalmente por dos motivos:

a) *La naturaleza probabilística*. La consecución de los objetivos tiene carácter probabilístico. La toma de decisiones resulta muy complicada porque se desarrolla en unas circunstancias dominadas por la incertidumbre. En estas condiciones es muy difícil establecer prioridades, sobre todo cuando se comparan magnitudes muy heterogéneas, como daños ciertos frente a riesgo catastrófico, y la asignación de probabilidades a cada alternativa es incierta.

b) *La variabilidad de la situación*. El orden de prioridades puede ser variable, dependiendo de la situación y de la evolución de la avenida. Todos los objetivos de gestión se aplican simultáneamente, pero a lo largo de una crecida suelen presentarse fases en las que predomina uno u otro, dependiendo de la situación general. Al comienzo de la crecida el objetivo de conservación del agua es el fundamental. A medida que avanza al proceso pueden ser más importantes los objetivos de protección del cauce y, en situaciones extremas, la protección de la seguridad de la presa. Una vez que pasa la punta, el objetivo fundamental es la recuperación del resguardo.

A continuación, se comentan los aspectos fundamentales relacionados con cada grupo de objetivos. Cada objetivo es dominante en una fase distinta de la avenida. Los mismos condicionan de alguna manera el diseño de modelos de gestión y optimización que por lo general dan prioridad a alguno de los objetivos en detrimento de otros.

2.1. Conservación del agua embalsada

El objetivo de conservación del agua embalsada tiene poca importancia frente al riesgo de la presa o los daños originados en el cauce, pero su influencia es muy grande en las avenidas de pequeña entidad y, sobre todo, en la fase inicial de la toma de decisiones. La gestión que tiene como objetivo la conservación del agua se limita a esperar a que se alcance la cota máxima de explotación sin desembalsar, y posteriormente mantener constante el nivel de agua en el resguardo fijado para la época del año correspondiente.

Esta estrategia puede no ser la más adecuada en avenidas de importancia, en las que conviene comenzar a desaguar con anticipación. En estos casos se afronta el riesgo de desperdiciar el agua desembalsada si no se cumplen las previsiones iniciales de entrada de caudales al embalse.

Esta circunstancia tiene una gran importancia en cuencas áridas, que reciben la mayor parte de sus

aportaciones en crecidas y afrontan largos periodos de sequía en los que el agua es muy valiosa.

La conservación del agua también juega un papel importante en las presas con aprovechamientos hidroeléctricos, ya que en estos casos se pretende realizar la mayor parte de los desembalses a través de las tomas de agua de la central, para aprovechar al máximo la energía. Esto puede limitar la capacidad de desagüe al caudal de equipo de la central, al menos hasta que se confirme la necesidad de abrir otros desagües, y condicionar el margen de maniobra del responsable de la explotación.

En situaciones normales, el objetivo de conservación del agua resulta decisivo en la fijación de resguardos de seguridad en las épocas de riesgo de avenidas, ya que el mantenimiento del resguardo obliga a desembalsar agua que podría ser muy valiosa.

2.2. Protección del cauce

Salvo en el caso de operación negligente de los órganos de desagüe, las presas producen siempre efectos beneficiosos en el cauce aguas abajo, puesto que la laminación del embalse disminuye la punta del hidrograma de avenida y retrasa su presentación. Este efecto se puede amplificar con una correcta operación de los órganos de desagüe, especialmente en avenidas de baja recurrencia, en las que pueden llegar incluso a anularse los caudales desaguados por la presa.

Para proteger correctamente el cauce de aguas abajo hay que tener en cuenta tanto el valor de los caudales como el instante de su presentación. En muchos casos es necesario retrasar la presentación de caudales para permitir la actuación de los equipos de aviso y evacuación. También es necesario limitar la variación brusca de caudales, que pueden causar daños por lo imprevisto de su presentación.

Para realizar una correcta gestión de la avenida en cuanto a la protección del cauce deben conocerse en primer lugar los daños producidos en el cauce por los distintos caudales desaguados. La mayor parte de las presas establecen unos umbrales de caudales de alerta, daños moderados, fuertes y catastróficos, basados en la experiencia de los responsables o en estudios hidráulicos específicos. A la hora de tomar la decisión de desaguar un caudal determinado debe ponderarse el daño que se originará aguas abajo frente al riesgo que supondría para la presa retener esos caudales en el embalse.

Si se superasen las previsiones iniciales de caudales de entrada al embalse, podría ser necesario desaguar al final de la avenida una punta mucho mayor de la que se habría desaguado si se hubiera comenzado el vertido con más anticipación. Esta decisión es ciertamente difícil, porque se compara un daño cierto frente a un riesgo, difícil de cuantificar económicamente, y porque la mayor parte de las variables que intervienen tienen una gran incertidumbre.

Por último, debe comentarse que existen presas que pueden producir daños en el cauce aguas arriba, por efecto del remanso originado por el embalse. Esto solamente sucede para niveles en el embalse, superiores al normal de explotación y próximos al de la avenida de proyecto, a menos que la sedimentación en el embalse reduzca significativamente su capacidad.

2.3. Protección de la presa

El objetivo fundamental del responsable de explotación de la presa es garantizar su seguridad en todo momento. Este principio elemental resulta, sin embargo, muy difícil de aplicar en la práctica, ya que el objetivo de seguridad de la presa entra en conflicto con el resto de los objetivos de explotación.

Dejando aparte incidentes excepcionales, la seguridad de la presa en una avenida está directamente relacionada con la máxima elevación que alcanza el agua en el embalse. De acuerdo con el tipo de presa y su situación estructural pueden definirse una serie de niveles asociados a distintas situaciones de riesgo. En principio, todas las presas tienen garantizada su estabilidad estructural hasta el nivel de

avenida de proyecto y la mayor parte de ellas pueden considerarse seguras hasta niveles de agua próximos a la coronación de la presa, aunque en estos casos podrían sufrir daños muy importantes en sus sistemas de desagüe. Para niveles de agua superiores, la seguridad de las presas de materiales sueltos decrece bruscamente, ya que los vertidos por coronación producirían el deterioro y posible desmoronamiento del cuerpo de presa. Las presas de fábrica resisten mucho mejor los vertidos por coronación, aunque el riesgo es siempre máximo en estas circunstancias.

La explotación del embalse debe estar siempre condicionada por la restricción de no superar el nivel de avenida de proyecto y, caso de no poder cumplir esta restricción, minimizar la máxima elevación de agua en el embalse. La dificultad del cumplimiento de estos objetivos surge del hecho de que es muy difícil pronosticar cuál sería la máxima sobreelevación que se obtendría con distintas estrategias de explotación, por la incertidumbre que existe sobre los factores que intervienen.

2.4. Recuperación del resguardo

El último objetivo durante la explotación del embalse en avenidas es la recuperación del resguardo de seguridad. Para ello debe bajarse el nivel del embalse hasta la cota fijada para esa época del año. El descenso del nivel del embalse debe hacerse con rapidez, ya que tras el paso de la avenida el terreno está en situación excepcionalmente húmeda, y nuevas lluvias producirían una crecida de mucha mayor intensidad, con lo que el riesgo es superior al normal.

Sin embargo, la recuperación del resguardo no puede hacerse de manera arbitrariamente rápida, ya que debe tenerse en cuenta la situación del cauce aguas abajo. Si se han producido desbordamientos, debe retenerse el agua en el embalse, para evitar que el caudal circulante por el río impida que se puedan drenar las zonas inundadas. También debe tenerse en cuenta la situación de otros embalses en el sistema de explotación, con los que deben coordinarse las operaciones de control.

3. MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE EN AVENIDAS

Existen tres enfoques básicos relacionados con la modelización del comportamiento del embalse durante la avenida:

a) El cálculo de laminación,
b) La gestión programada y
c) La optimización de la gestión.

El cálculo de la laminación consiste en la definición de los niveles alcanzados por el agua y los caudales evacuados por los órganos de desagüe durante una avenida, a partir de una estrategia de explotación determinada. La gestión programada consiste en la aplicación de unas reglas de operación de los desagües en función de la situación del embalse. Estas reglas están normalmente descritas en las Normas de Explotación de la presa. El cálculo de optimización consiste en la definición de la estrategia de explotación óptima de acuerdo con una serie de objetivos y restricciones. El cálculo de la laminación es muy sencillo y puede realizarse incluso de forma manual. La modelización de la gestión programada puede igualmente programarse de manera sencilla, aunque el procedimiento puede llegar a ser muy complejo. La definición de la estrategia óptima es un problema cuya formulación matemática es más complicada y cuya resolución requiere de métodos computacionales.

3.1. Cálculo de la laminación en un embalse

El cálculo de la laminación de la avenida se basa en un simple balance de masas: la variación del volumen de agua almacenado en el embalse durante un periodo determinado debe ser igual al balance entre los volúmenes que entran y salen del embalse. La complejidad del cálculo de la laminación consiste en que tanto los volúmenes almacenados como los caudales desaguados son función de la cota de agua en el embalse z, por lo que en la resolución numérica se plantean ecuaciones implícitas,

que es necesario resolver por métodos numéricos. Puede utilizarse, por ejemplo, el método de Puls.

3.2. Gestión programada del embalse

Los métodos de gestión programada persiguen especificar cómo se realizará la operación del embalse mediante un conjunto de reglas o un algoritmo que permite definir en un instante determinado la posición de los órganos de desagüe. Como ejemplo, se describe el Método de Evaluación Volumétrica (M.E.V.). Este método de laminación de avenidas ha sido propuesto por Girón (1988) en el XVI Congreso de Grandes Presas, San Francisco 1988 (Q63, R75).

Las variables que es necesario conocer para lograr la mejor laminación posible de una avenida en un embalse son:

- El hidrograma de la avenida con una antelación determinada.
- La cota del embalse en el momento en que se presenta la avenida.
- Las características del aliviadero y desagües.
- La curva característica del embalse (cotas-volumen).

En un caso normal se conocen las tres últimas variables. En cuanto al hidrograma de entrada, no se tiene conocimiento del mismo con ninguna antelación, lo cual implica que cualquier criterio seguido para la laminación de las riadas será independiente de la magnitud de la punta de avenida, ya que sólo podrá estar basado en la cota del embalse en cada momento y en los valores de los caudales que hayan entrado al embalse, por lo que el mismo criterio puede ser favorable para un tipo determinado de hidrogramas y perjudicial para otros.

Sin embargo, para evitar lo anterior los métodos comúnmente utilizados adoptan las siguientes premisas que permiten aproximar los criterios extremos:

- Desaguar menos caudal que el que entra.
- Aumentar el caudal de desagüe si aumenta el de entrada.
- A cota de embalse más elevada (menos resguardo), mayor incremento porcentual del caudal de salida.

$$Q_{S_{i+1}} = Q_{S_i} + P(Q_{S_i} - Q_{S_i})$$
$$P = f(resguardo)$$

Estas leyes del porcentaje de incremento del caudal de salida tienen, entre otros, el inconveniente de ser muy sensibles al intervalo de tiempo entre los instantes de la toma de datos del estado del embalse en los que se aplica la corrección del caudal de salida. Este inconveniente se resuelve con el Método de Evaluación Volumétrica.

El Método de Evaluación Volumétrica desarrolla la siguiente idea: En un instante i, la diferencia entre el caudal de entrada Q_{E_i} y el de salida Q_{S_i}, multiplicada por Δt (intervalo entre lecturas de niveles y correcciones del caudal de salida), da como resultado el volumen neto ΔV_i de agua que ha entrado al embalse. El volumen disponible en el embalse en ese instante Vd_i, para laminar la avenida, dividido por el valor anterior, es igual al número de intervalos de Δt restantes para que el embalse agote el resguardo, si el caudal neto de entrada al embalse, dado por la diferencia $(Q_{E_i} - Q_{S_i})$ se mantiene constante, es decir:

$$\frac{Vd_i}{(Q_{E_i} - Q_{S_i})\Delta t} = n$$

Si se considera que cuando el embalse esté lleno el caudal de salida tiene que ser igual al de entrada, y que el aumento de caudal de salida se hace linealmente hasta alcanzar al de entrada en el tiempo $\Delta t.n$, resulta que cada intervalo de tiempo Δt se tiene que incrementar el caudal de salida en la siguiente cantidad:

$$Q_{S_{i-1}} - Q_{S_i} = \frac{Q_{E_i} - Q_{S_i}}{n} = \frac{\left(Q_{E_i} - Q_{S_i}\right)^2 \Delta t}{Vd_i} = \frac{\Delta V_i^2}{Vd_i \Delta t}$$

Por lo tanto, el método precisa, para ser aplicado, conocer únicamente el volumen de resguardo disponible Vd_i, y el cambio de volumen en el embalse en el intervalo de tiempo Δt.

3.3. Optimización de la gestión

El cálculo de laminación permite obtener los caudales evacuados por el embalse en función de los caudales de entrada y el estado de los órganos de desagüe. En una situación real, lo que se pretende definir es precisamente el estado de los órganos de desagüe que conduce a la mejor explotación del embalse. Los métodos de cálculo de laminación no resuelven este problema, ya que suponen que la operación del embalse es un dato.

En este caso se trata de un problema de optimización, ya que se pretende definir la estrategia óptima de explotación del embalse en función de unos objetivos determinados. El problema de optimización puede plantearse en forma simplificada como sigue.

En un instante determinado, se quiere programar la gestión de los órganos de desagüe de la presa en un horizonte temporal definido. Si se divide el plazo de actuación en $n-1$ intervalos de tiempo, se pueden definir $4n$ variables, correspondientes a los caudales de entrada Q_{E_i}, a los caudales de salida Q_{S_i}, a los volúmenes embalsados V_i y a las cotas de agua en el embalse z_i.

De estas variables se conocen los valores iniciales Q_{E_1}, Q_{S_1}, V_1 y z_1. Además, existen relaciones funcionales que ligan las variables entre sí: la curva característica del embalse $V(z)$, la ecuación de balance de masas en la laminación $\frac{dV}{dt} = Q_E - Q_S$ y la capacidad máxima $Q_m(z)$ y mínima $Q_n(z)$ de desagüe en función de la cota de agua en el embalse. La programación de los desembalses puede abordarse si se suponen también conocidos los caudales de entrada Q_{E_i} en todo el plazo de actuación.

El problema consiste en obtener la serie de caudales de salida Q_{S_i} que cumplen las restricciones impuestas por las ecuaciones mencionadas y minimizan una función objetivo de costes. La expresión de la función de costes es la clave del problema, puesto que refleja la política con la que se pretende gestionar el embalse. Su formulación matemática es complicada. En una primera aproximación, se puede suponer que la función de costes incluirá varios sumandos, que deben ponderar los siguientes efectos no deseables:

- Elevación de la cota de agua por encima de un umbral admisible, que pueda poner en riesgo la seguridad de la presa.
- Vertidos superiores a la capacidad hidráulica de transporte del cauce aguas abajo de la presa
- Pérdida de agua embalsada al final del episodio
- Velocidad excesiva de variación de la lámina de agua en el embalse
- Velocidad excesiva de variación del caudal a la salida

De acuerdo con Labadie (2004), la función objetivo genérica para un problema de optimización de la gestión de un embalse puede formularse del siguiente modo:

$$min \sum_{t=1}^{T} \alpha_t . f_t(s_t, r_t) + \alpha_{T+1} . \varphi_{T+1}(s_{T+1})$$

Donde:
r_t: vector variable de decisión, por ejemplo, el caudal vertido en cada etapa t.
T: horizonte de operación
s_t: vector de variable de estado, por ejemplo, el nivel (o volumen) en el embalse al inicio de cada etapa t.
$f_t(s_t, r_t)$: objetivo a minimizar
α_t: factor de descuento que incorpora a la formulación el valor presente de futuros costes. En el caso de α_{T+1} tiene en cuenta futuros costes más allá del horizonte operacional.
φ_{T+1}: término que representa la estimación de costes futuros que puedan suceder más allá del horizonte operacional.

Las restricciones vienen dadas por la ecuación de balance hídrico del embalse, los niveles máximo y mínimo que puede tomar la variable de estado, y los valores máximo y mínimo que puede tomar la variable de decisión. En el caso de que el estado esté representado por el volumen en el embalse, los límites serían el embalse vacío (o embalse muerto) y el volumen a cota de coronación. Si la variable de decisión es el caudal vertido, sus límites están regidos por la capacidad hidráulica de los órganos de desagüe (caudal máximo y mínimo que puede verter para un nivel dado en el embalse).

Del análisis del estado del arte en materia de optimización de la gestión de embalses en situación de avenidas, se observa que, si bien las técnicas de optimización se han estudiado ampliamente para objetivos como la generación hidroeléctrica, para la operación en avenidas no se encuentra desarrollado con igual profundidad (Needham et al., 2000; Windsor, 1973). Esta tendencia se ha visto modificada en los últimos 15 años, especialmente con la inclusión de los métodos heurísticos.

En general, las técnicas de optimización pueden clasificarse según dos criterios: la forma en que consideran la naturaleza estocástica de (todas o parte de) las variables, la forma en que consideran las relaciones entre las variables de la función objetivo y de las restricciones (Rani & Moreira, 2010).

La primera de las clasificaciones separa los métodos de optimización en los que tratan la aleatoriedad de las variables de forma implícita o determinísticos (técnicas ISO, *implicit stochastic optimization*), y aquellos que consideran estas características de forma explícita (técnicas ESO, *explicit stochastic optimization*).

Las técnicas ESO pueden bien considerar la variabilidad en la función objetivo, donde ésta minimiza la esperanza matemática del objetivo, o bien considerar la aleatoriedad en las restricciones las cuales son expresadas a través de términos de probabilidad (Labadie, 2004).

La segunda clasificación habitualmente agrupa las siguientes categorías: programación lineal (simple, entera y entera mixta), no lineal y programación dinámica. De los modelos mencionados en la literatura, las técnicas de programación lineal, debido a su relativa sencillez en la formulación y el cómputo, y las técnicas de programación dinámica, por su adecuada adaptación a la no linealidad de las relaciones involucradas y a la dimensión temporal que permiten abordar, facilitando el análisis en tiempo real, son los modelos más difundidos para la optimización de embalses (Yeh, 1985; Wurbs, 1993; Labadie, 2004). Además, permiten incorporar la naturaleza estocástica de los caudales entrantes de forma explícita. A pesar de esto, los modelos tienen sus limitaciones y desventajas, como el requerimiento de linealidad en las relaciones (programación lineal) y la denominada maldición de dimensionalidad (en programación dinámica) que hacen necesario ahondar en este campo para su implementación práctica.

En los últimos 20 años, han adquirido relevancia los algoritmos evolutivos como los algoritmos genéticos y las redes neuronales, así como las reglas de operación basadas en teoría difusa, por su relativa sencillez en la implementación y su facilidad para tratar con problemas no lineales y relaciones complejas entre las variables (Wei & Hsu, 2009. Labadie, 2004, Shim et al., 2002; Chang et al., 2005a). Sin embargo, estos algoritmos brindan en general modelos a medida de un sistema concreto y son de difícil generalización. También se vienen desarrollando algunos modelos híbridos que permiten combinar las ventajas de varias técnicas de optimización para evitar o reducir las desventajas de éstas (Cai et al., 2001; Wei et al., 2008; Chang et al., 2005b). Modelos capaces de incorporar la información de pronósticos y de atender la incertidumbre de las variables son necesarios para implementar sistemas de ayuda a la decisión en la gestión de avenidas (Malekmohammadi et al., 2010).

A continuación, se explican los métodos de optimización más difundidos en el ámbito de la gestión de embalses.

Si todas las relaciones que intervienen en el problema pueden formularse mediante funciones lineales, la resolución puede abordarse mediante programación lineal. En principio, la curva característica y las funciones de desagüe no serán lineales, pero podrán aproximarse mediante poligonales. En cambio, la evaluación de costes que intervienen en la función objetivo es difícilmente linealizable, ya que deberá expresarse en función de valores absolutos o máximos. También se puede abordar una codificación no lineal del problema, aunque en este caso la obtención del mínimo de la función de costes se complica desde el punto de vista matemático, pudiendo obtenerse situaciones de mínimo local en función del punto de partida, salvo en aquellos casos en los que la formulación del problema sea convexa. La solución de los problemas no lineales se puede obtener mediante modificaciones de los algoritmos de programación lineal, o mediante otros métodos de optimización, como las redes de flujo o los métodos de búsqueda por gradiente. Esta técnica resulta más difícil de adaptar para implementar en tiempo real e incorporar la naturaleza estocástica de los hidrogramas de entrada. Las técnicas de programación no lineal son más habituales cuando está involucrada la generación hidroeléctrica en la gestión del embalse.

Una opción alternativa para abordar el problema es la programación dinámica. En el enfoque de la programación dinámica, el problema se descompone en una sucesión de etapas. La función objetivo se formula como una ecuación recursiva: en una etapa cualquiera el valor de la función objetivo se obtiene a partir del valor de la función en la etapa anterior (esquema directo) o posterior (esquema inverso). En cada etapa se adoptan decisiones de control que modifican el estado del sistema en la etapa siguiente de manera óptima. Una de las mayores desventajas de la programación dinámica (PD) es el problema de dimensionalidad (cantidad de variables de estado, de restricción y de decisión). Por ello, el método original desarrollado por Bellman en 1957, conocido como programación dinámica discreta (PDD), ha sido modificado por diversos investigadores dando a lugar a numerosas variantes que buscan reducir este problema. Las variantes más representativas son: PD incremental, PD discreta diferencial, y PD con aproximaciones sucesivas.

Luego han surgido variantes que son combinaciones de las anteriores mencionadas. Una nueva técnica de PD que difiere de las anteriores se denomina, según su designación en inglés, Folded Dynamic Programming (FDP) y fue desarrollada por (Kumar et al, 2010).

Todos estos métodos de cálculo tienen variantes que permiten tener en cuenta la incertidumbre parcial o total sobre algunos datos del problema, en especial el caudal de entrada al embalse. En estos casos, el cálculo se complica considerablemente, ya que será necesario razonar sobre las funciones de distribución de probabilidad de las variables que intervienen, además de sobre los valores medios de dichas variables. En principio, este planteamiento puede parecer más realista que el cálculo

determinístico, puesto que incluye la incertidumbre sobre algunos aspectos del problema.

Sin embargo, desde el punto de vista matemático, conduce a formulaciones mucho más complejas dependientes de un mayor número de parámetros cuyos valores suelen desconocerse, a priori, debiendo ser también estimados. Esto puede llevar a que las soluciones que se obtienen sean incluso menos representativas de la esencia del problema que las obtenidas por métodos determinísticos.

Una alternativa al tratamiento explícito del carácter estocástico en la formulación del problema de optimización, consiste en combinar técnicas de simulación en entorno de Monte Carlo con un método de optimización determinístico. Es decir, por ejemplo, los hidrogramas se generan según técnicas de Monte Carlo para tener en cuenta su variabilidad, pero una vez que ha sido generada la serie, ésta es introducida en el modelo de optimización que la considera fija (determinista). La serie de hidrogramas se puede generar con un número suficiente de éstos a fin de contar con un conjunto representativo de situaciones para las cuales se resuelve el problema de optimización.

4. ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DESDE UN ENFOQUE PROBABILÍSTICO

En esta sección se presenta un ejemplo de análisis de métodos de manejo de embalses en crecidas que tiene en cuenta el carácter estocástico de las variables que intervienen en el problema. En el último tercio del siglo XX y principios del XXI se han producido una serie de progresos que permiten abordar el problema de la gestión de embalses ante avenidas desde un enfoque probabilístico. Desde el punto de vista metodológico, se ha desarrollado la disciplina de modelación estocástica de la lluvia, que permite caracterizar la distribución espacio/temporal del campo de precipitaciones desde un enfoque probabilístico. Igualmente, la modelación del proceso lluvia-escorrentía ha sufrido una transformación análoga, en la que se han introducido progresivamente los factores de naturaleza probabilística, tanto en la fase de calibración de los modelos como en la generación de resultados. En conjunto, se dispone de herramientas de simulación que pueden reproducir satisfactoriamente la variabilidad observada en los procesos naturales.

Dado el carácter estocástico de alguna de las variables involucradas y los avances mencionados para el estudio de los diferentes procesos que intervienen, en este trabajo se plantea la utilización de técnicas de análisis probabilístico para evaluar el comportamiento de diferentes modelos de gestión de embalses.

De esta forma es posible realizar una evaluación del desempeño de diferentes modelos de simulación de los embalses ante un amplio rango de solicitaciones hidrológicas y permite además realizar análisis de sensibilidad de algunas variables (como por ejemplo el nivel inicial en el embalse), de modo que el responsable de explotación pueda evaluar su influencia en el resultado final.

4.1. Planteamiento metodológico

El esquema de trabajo seguido se presenta en la Figura 1. El análisis se basa en un entorno de simulación del comportamiento del embalse frente a las avenidas basado en el método de Monte Carlo. El entorno permite generar una colección representativa de hidrogramas de entrada a la presa y simular su paso por el embalse siguiendo un método de laminación especificado.

El proceso de generación de hidrogramas implica la modelación hidrológica de la cuenca vertiente mediante la generación de eventos de lluvia, la transformación lluvia-escorrentía y la propagación de avenidas en el cauce. El módulo de generación de hidrogramas realiza la calibración siguiendo dos criterios: el ajuste de la ley de frecuencias de caudales máximos de entrada al embalse y el ajuste de la ley de frecuencia de volúmenes diarios del hidrograma de entrada al embalse.



Figura 1. Esquema metodológico del estudio.

Los hidrogramas así generados son procesados mediante los dos métodos de gestión del embalse: el Método de Evaluación Volumétrica de Girón y el método de optimización de la gestión del embalse basado en Programación Lineal Entera Mixta (PLEM).

El entorno de evaluación de comportamiento permite sintetizar los datos para evaluar el comportamiento global del modelo y su configuración. Se define un único indicador o un número reducido de indicadores que resuma el comportamiento global frente al conjunto todas las solicitaciones. En el trabajo se emplearon índices de riesgo de los caudales y los volúmenes. Estos índices brindan información sobre el comportamiento del modelo para el conjunto de avenidas laminadas para cada modelo que se analiza. Para cada configuración se determinan las curvas de probabilidad acumulada de no excedencia del conjunto de laminaciones, correspondiendo una curva a los máximos caudales vertidos, y la segunda a los máximos volúmenes alcanzados en el embalse. Se definieron dos valores de referencia (Ref_1 y Ref_2) para ambas curvas. El valor Ref_1 se escoge de forma que por debajo de ese valor prácticamente no se esperan daños. Por ejemplo, en el caso de los caudales es la máxima capacidad del cauce que no produce daños. El valor Ref_2 es un valor cuya probabilidad de suceder es muy pequeña (probabilidad acumulada de no excedencia $\approx$ 1). Por ejemplo, para la curva de volumen sería el volumen a nivel de avenida extrema.

Los índices de riesgo de caudal y de volumen, Iq_p e Iv_p, se definen como el ratio del área entre la curva de probabilidad y la vertical correspondiente a Ref_1 (área1), y el área rectangular entre Ref_1, Ref_2 y las horizontales pr=0 y pr=1 (área2). Él cálculo de los índices de riesgo se realiza según las expresiones siguientes:

$$Iq = \frac{\text{Área } 1^q}{\text{Área } 2^q} = \frac{\sum_{i=Ref_1}^{N}\left(Q_i - Ref_1^q\right)\Delta pr_i}{Ref_1^q - Ref_2^q}$$

$$Iv = \frac{\text{Área } 1^v}{\text{Área } 2^v} = \frac{\sum_{j=Ref_1}^{N}\left(V_j - Ref_1^v\right)\Delta pr_j}{Ref_1^v - Ref_2^v}$$

Donde:

Iq: índice de riesgo de caudales máximos vertidos para el conjunto de simulaciones con una configuración determinada.

Iv: índice de riesgo de volúmenes máximos alcanzados para el conjunto de simulaciones con una configuración determinada.

Ref_1^q, Ref_1^v: valor de referencia inferior de caudales o volúmenes. Sólo se consideran en el cálculo del numerador, área1, aquellos valores de caudal o volumen mayores o iguales que esta referencia.

Ref_2^q, Ref_2^v: valor de referencia superior de caudales o volúmenes. Establece, junto con Ref_1, el rango de referencia, área2, con el cual se compara el área 1 para determinar el índice de probabilidad de caudal, Iq, o volumen, Iv.

Δpr_i: diferencia entre las probabilidades acumuladas correspondientes al caudal Q_i y al Q_{i-1}.

Δpr_j: diferencia entre las probabilidades acumuladas correspondientes al volumen V_jVj y al V_{j-1}.

En la Figura 2 se esquematiza lo indicado en las expresiones matemáticas arriba escritas. Evidentemente, la alternativa que proporcione los menores valores de estos dos índices será considerada la mejor para la gestión del embalse frente a las solicitaciones previstas.

Si se quiere realizar una comparación sencilla, se puede definir un índice de riesgo global como la suma de los índices de riesgo de caudal y volumen, afectados por los coeficientes de ponderación que se estimen adecuados.

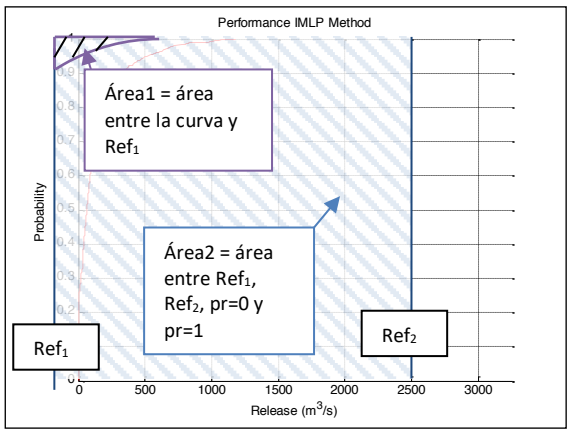


Figura 2. Ejemplo de curva de probabilidad acumulada de caudal máximo vertido y esquema del cálculo del índice de probabilidad ($\boldsymbol{Iq_p}$).

4.2. Caso de estudio

El caso de estudio que se presenta corresponde a la presa de Talave, situada en el río Mundo, en la cuenca del Segura. La presa tiene una altura de 36 m y un volumen de embalse a NMN de 34,83 hm^3, con la coronación situada a 512,4 m. El volumen de embalse disponible para laminación entre el NMN y el NAP es 4,28 hm^3. La cuenca vertiente es de 766 km^2, con una avenida de proyecto de 454 m^3/s para 1000 años de periodo de retorno. La presa dispone de un aliviadero de labio fijo y uno de compuertas y un desagüe de fondo. La capacidad de vertido a NAP es de 326 m^3/s por el aliviadero y 100 m^3/s por el desagüe de fondo.

En la Figura 3 se comparan los caudales máximos vertidos según los dos modelos analizados, respecto de los caudales punta de entrada, variable que caracteriza la magnitud de las avenidas. En la Figura 4 se muestra la comparación de los dos métodos analizando los caudales vertidos y niveles alcanzados en el embalse para cada avenida.

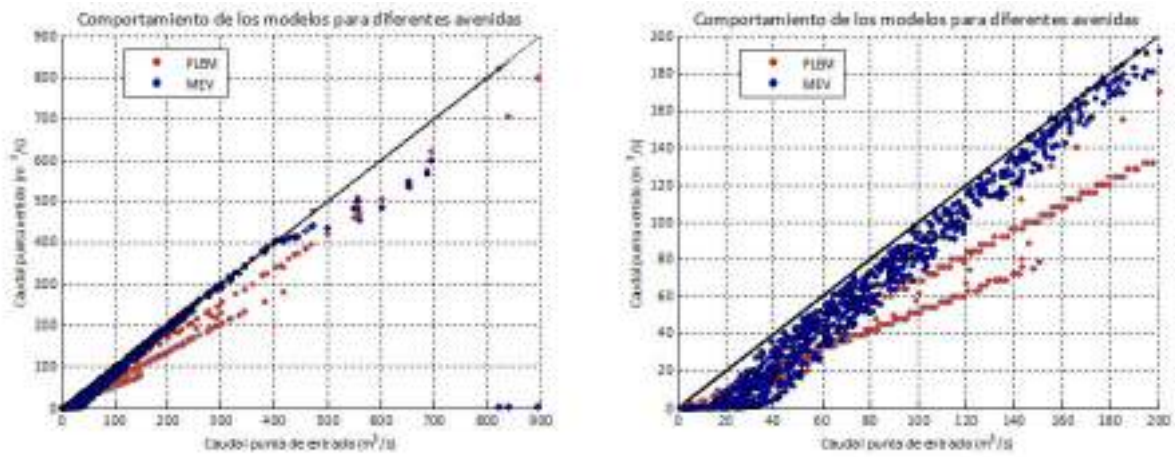


Figura 3. Caudales máximos vertidos en función del caudal punta de la avenida. Izquierda: rango total. Derecha: caudales bajos.

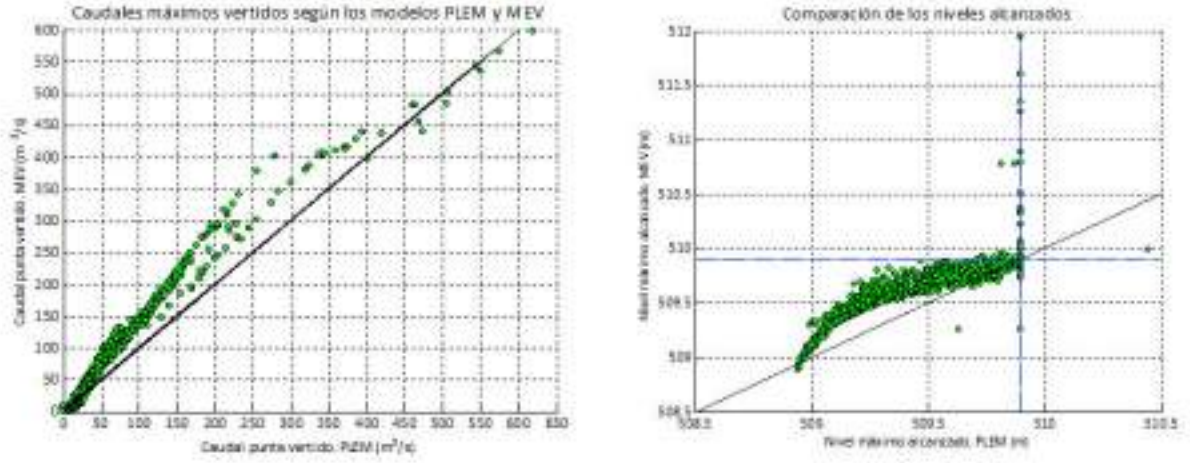


Figura 4. Comparación de caudales máximos vertidos y máximo nivel alcanzado en el embalse mediante los dos métodos.

En las figuras se observa que para avenidas de escasa magnitud $(Q_p < 50\ m^3/s)$ y de gran magnitud $(Q_p > 450\ m^3/s)$ el comportamiento de ambos modelos es similar. Sin embargo, para las avenidas intermedias, el modelo PLEM gestiona estos eventos de forma más eficiente, desde el punto de vista de los caudales máximos. Al comparar los niveles máximos alcanzados en el embalse según ambos métodos, se observa que en un primer tramo el modelo PLEM alcanza niveles menores, a partir del nivel de activación el modelo MEV alcanza niveles inferiores al PLEM, pero ambos se mantienen en niveles "seguros". Alcanzado el NMN, el PLEM se mantiene en ese valor mientras que los niveles en el MEV se incrementan hasta valores próximos a coronación.

La Figura 5 compara las respuestas de los modelos PLEM y MEV a través de las distribuciones de probabilidad de caudales máximos vertidos y de volúmenes máximos almacenados, respectivamente. En ambos casos, a la derecha de la vertical de referencia, el área sobre las curvas correspondientes al PLEM son menores que las correspondientes al MEV. Consecuentemente, el índice de riesgo tiene un valor menor para el PLEM que para el MEV. Las distribuciones de probabilidad de caudales difieren apreciablemente, en lo que respecta al área sobre dichas curvas, entre el caudal de alerta (50 m^3/s) y el caudal de emergencia (300 m^3/s). Por encima de este último valor las curvas prácticamente coinciden. Por debajo del caudal de alerta, las curvas dejan sobre ellas un área similar.

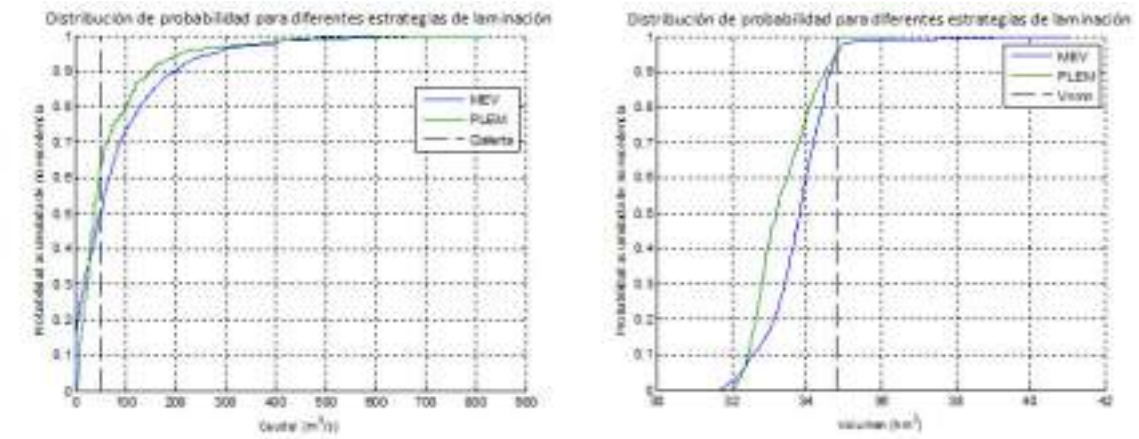


Figura 5. Curvas de probabilidad de caudales máximos vertidos y máximo volumen en el embalse para las avenidas analizadas.

En la Figura 6 se muestran dos ejemplos de la laminación conseguida mediante los modelos en dos avenidas concretas. Se cómo, a igual avenida, el modelo PLEM desagua caudales máximos inferiores al MEV debido a que inicia el vertido de forma anticipada, en este caso siguiendo el hidrograma de entrada. En cambio, el MEV inicia el vertido cuando alcanza el nivel de activación (desfase entre el inicio de los hidrogramas de entrada y de salida). Esto es así porque el método PLEM juega con la ventaja de conocer completamente la totalidad del hidrograma en la laminación.

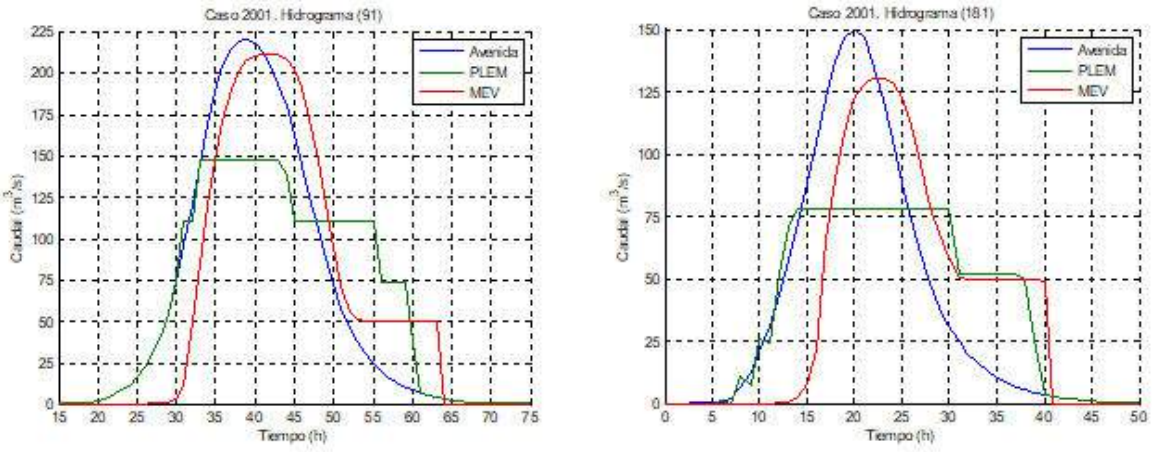


Figura 6. Ejemplo de laminación realizada por los modelos en dos de las avenidas analizadas.

5. CONCLUSIÓN

En la presente ponencia se discute el efecto laminador de los embalses. Se presentan las técnicas de análisis más habituales, que permiten el dimensionamiento de los órganos de desagüe, la especificación de resguardos estacionales de seguridad o la explotación del embalse durante la crecida.

Como ejemplo se ha presentado la comparación del modelo gestión programada de Girón (o MEV) y el modelo de optimización basado en programación lineal entera mixta denominado PLEM. Las solicitaciones hidrológicas se generaron mediante simulaciones de Montecarlo, como un medio para tratar con la característica estocástica de esta variable de entrada. Se aplicó una metodología de evaluación global que analiza el comportamiento de una estrategia de laminación para el conjunto de 1000 avenidas sintéticas, a través del cálculo del índice de riesgo global, que es la suma de los índices

de riesgo en volúmenes y caudales. Empleando dicha metodología de evaluación se comparó el comportamiento de los dos modelos para las avenidas estudiadas. La evaluación se realizó teniendo en cuenta tanto los caudales máximos vertidos como los niveles máximos alcanzados (o volúmenes) en el embalse. Se comprobó que, aunque el método PLEM proporciona mejores resultados globales, la distancia con el MEV no es excesivamente grande, por lo que el MEV es un método adecuado para la laminación de crecidas en el embalse de Talave. Es importante destacar que el MEV es un método reactivo mientras que el modelo PLEM conoce previamente el hidrograma completo (pronóstico preciso). Esto, por un lado, pone aún más en valor la eficiencia del MEV para la gestión de avenidas.

Por otro lado, se pone de manifiesto que resulta esencial mejorar el pronóstico de las avenidas para optimizar la gestión de los embalses.

REFERENCIAS

- Cai, X. et al. (2001). Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advances in Water Resources,* 24, 667-676.
- Chang, F-J., Chen, L. & Chang, L-C. (2005a). Optimizing the reservoir operation rule by genetic algorithm. *Hydrological Process,* 9(11), 2277-2289.
- Chang, Y-T., Chang, L-C. & Chang, F-J. (2005b). Intelligent control for modeling of real time reservoir operation, part II: Artificial neural network with operating rule curves. *Hydrological Process,* 19(7), 1431-1444.
- Chang, L-C. (2008). Guiding rational reservoir flood operation using penalty type genetic algorithm. *Journal of Hydrology,* 354, 65-74.
- Girón, F. (1988). The evacuation of floods during the operation of reservoirs. *International Commission of Large Dams, Congress San Francisco*. US Q63 R75.
- Kumar, D. et al. (2010). Optimal reservoir operations for flood control using folded dynamic programming. *Water Resources Management,* 24, 2419-2436.
- Labadie, J. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 130(2), 93-111.
- Lund, J. & Ferreira, I. (1996). Operating rule optimization for Missouri River reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 122(4), 287-295.
- Malekmohammadi, B., Zahraie, B. & Kerachian, R. (2010). A real time operation optimization model for flood management in river reservoir systems. *Natural Hazards*, 53(3), 459-482.
- Malekmohammadi, et al. (2009). Developing monthly operating rules for a cascade system of reservoirs: application of Bayesian networks. *Environmental Modeling and Software*, 24, 1420-1432.
- Needham, J., Watkins, D., Lund, J. & Nanda, K. (2000). Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 126, 1291-1297.
- Rani, D. & Moreira, I. (2010). Simulations-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*, 24, 1107-1138.
- Shim, K-C. et al. (2002) Spatial decision support system for integrated river basin flood control. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 128(3), 190-201.
- Wei, C-C. & Hsu, N-S. (2009). Optimal tree based release rules for real time flood control operations on a multipurpose reservoir system. *Journal of Hydrology,* 365, 213-224.
- Wei, C-C. & Hsu, N-S. (2008). Multireservoir real time operations for flood control using balanced water level index method. *Journal of Environmental Management,* 88, 1624-1639.
- Windsor, J. (1973). Optimization model for the operation of flood control systems. *Water Resources Research,* 9(5), 1219-1226.
- Wurbs, R. (1993). Reservoir system simulation and optimization models. *Journal of Water*

Resources Planning and Management, 119(4), 455-472.

- Yeh, W. (1985). Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.

LAS POLÍTICAS DE GESTIÓN DE RIESGOS Y DESASTRES DE DISTINTOS ORGANISMOS MULTILATERALES Y SU REPERCUSIÓN SOBRE EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN FRENTE A INUNDACIONES

Ignacio Escuder Bueno
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, España
iescuder@hma.upv.es
http://orcid.org/0000-0002-3929-4216

RESUMEN

El presente artículo introduce el moderno concepto de gobernanza de riesgos en infraestructuras civiles y presenta como éste se ha materializad en el campo de las presas y embalses durante el presente, para en última instancia explicar cómo es previsible que las políticas de distintos organismos multilaterales (financiadores) potencien significativamente estas buenas prácticas en el conjunto de las obras hidráulicas y en todo tipo de actuaciones de protección frente a inundaciones.

1. LA GOBERNANZA DE RIESGOS Y LAS INFRAESTRUCTURAS CIVILES

Jonhston y Hansen (2011) definen gobernanza como la "colección de tecnologías, personas, políticas, prácticas, recursos, reglas sociales e información que interaccionan para apoyar las actividades de gobierno". Para ellos gobernanza es un concepto más amplio que gobierno y además aportan una segunda definición de gobernanza en el mismo texto como "la interacción de procesos, información, reglas, estructuras y normas que rigen el comportamiento para conseguir objetivos que impactan en un número significativo de personas". Consecuentemente, reconocen como algunos de los principales atributos de la gobernanza aspectos como la escasez de recursos, la coordinación de diversos actores involucrados, los procesos de toma de decisiones y los de resolución de conflictos.

Wilke (2007) defiende que la pregunta pertinente no consiste en si debería haber más o menos gobierno, alejándose de la desenfocada (en su opinión) discusión sobre el tamaño del gobierno (o del sector público), sino que lo pertinente sería centrarse en entender cómo crear distintas formas de gobernanza que incorporen más "inteligencia".

En este contexto define "gobernanza inteligente" como un "ensamblaje de principios, factores y capacidades que conforman una forma de gobernanza apropiada para las condiciones y exigencias de la sociedad del conocimiento". Estas exigencias a las que debe enfrentarse la gobernanza inteligente podrían resumirse en afrontar la complejidad y la incertidumbre, así como crear capacidades y resiliencia.

Wilke (2007) afirma también que la creación de nuevo conocimiento se vuelve fundamental con la ascendencia de la innovación al primer plano de la carrera global por la competitividad, dejando claro

eso sí que, incluso cuando ese nuevo conocimiento ya existe, tiene que luchar por ser aceptado contra muchas resistencias y numerosas dificultades. En resumen, podría decirse que las formas de gobernanza más inteligentes son aquellas mejor equipadas para adoptar y fomentar la innovación.

En el espectro de la gobernanza, el tema de la gestión de riesgos se ha convertido además en un aspecto muy relevante tanto desde el punto de vista teórico como práctico. Aven y Renn (2010), entre otros, han identificado algunas de las características del riesgo en el mundo moderno y remarcan el hecho de que mientras el desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha reducido el nivel de riesgo individual, la vulnerabilidad de numerosas sociedades o de amplios grupos dentro de las mismas ha aumentado.

En este contexto ellos utilizan el término "riesgos sistémicos emergentes" como aquellos riesgos que "afectan a los sistemas de los que depende la sociedad: salud, transporte, medio ambiente, telecomunicaciones, etc.". De hecho, el tema de los riesgos sistémicos y los principios sobre los que debe sustentarse la gobernanza para afrontarlos fueron objeto de un "White Paper" de la Comisión Europea (EC, 2001) en el que se identificaban la "apertura, participación, trazabilidad, eficacia, coherencia, proporcionalidad y subsidiariedad".

Una definición de "gobernanza de riesgos" inclusiva de acuerdo con el International Risk Governance Council (2005), sostiene que ésta incluye "la totalidad de actores, reglas, convenciones, procesos y mecanismos relacionados con cómo se recopila, analiza y comunica la información relevante desde el punto de vista del riesgo, y cómo se toman las decisiones de gestión". Algo más tarde, Renn (2008) resumió el mismo concepto como la traslación de la sustancia y el cuerpo de principios de la gobernanza al contexto del riesgo y la toma de decisiones relacionadas con el mismo", aspecto este último que típicamente se ha tratado en la literatura dividido en las categorías de evaluación, gestión y comunicación de riesgos.

Vale la pena también mencionar otras contribuciones a la gobernanza de riesgos en general como aquellas que provienen de estándares como la ISO 31000:2009 (ISO 2009), en gestión de riesgos y que proveen las bases conceptuales para identificar, evaluar y gestionar riesgos en cualquier contexto organizativo y operacional.

A pesar de haber sido capaces de definir "gobernanza", "gobernanza inteligente", "riesgos sistémicos" y "gobernanza de riesgos" de forma estructurada y vinculando cada una de las definiciones entre sí, no se encuentra todavía hoy ningún procedimiento que permita analizar la eficacia de los sistemas de gobernanza de riesgos en el campo de las infraestructuras civiles, quizás con la excepción del iGOPP (Índice de Gobernanza y Políticas Públicas) elaborado y publicado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2014) aplicado para el caso particular de la gestión de riesgos de desastres naturales.

Consecuentemente, si en palabras de Van Asselt y Renn (2011), "los cambios de paradigma y las reformas no suceden en abstracto, sino que se sustancian en la práctica", y citando a Boholm, Corvellec, and Karlsson (2012) afirman que "la gobernanza de riesgos no es un marco sobre el que construir, sino que es algo que se aprende a hacer" vincular la teoría y la práctica en la materia sigue siendo de primera necesidad en el campo que nos ocupa.

En otros campos sí existe un trabajo muy profuso y un número ciertamente significativo de publicaciones. La mayoría de ellas se centran en lo que se denomina "Enterprise Risk Management" (Zhao, Hwang, and Low 2015), y tratan el asunto de los riesgos sistémicos fundamentalmente desde la perspectiva financiera, a distintas escalas, y para una amplia variedad de sectores de actividad económica. De todas formas, incluso dentro de las corporaciones que han implementado distintas

modalidades de gobernanza de riesgos, Marks (2014) afirma que muy pocas ven dichos sistemas como un refuerzo de sus estrategias de desarrollo y consolidación, e incluso un porcentaje significativo de analistas considera dichas formas de gobernanza de riesgos inadecuadas.

De todas formas, el importante asunto de los riesgos sistémicos ciertamente no se vincula en el mundo moderno exclusivamente a asuntos financieros. Entre otros, la actividad volcánica, los movimientos sísmicos, las inundaciones, los tsunamis, los incendios forestales o el terrorismo son amenazas activas que pueden dañar los propios sistemas de infraestructuras civiles y/o interrumpir los servicios que éstos prestan. El rango de afecciones pude ir desde algo simplemente molesto hasta irremisiblemente catastrófico, sobretodo en un contexto que continuo aumento de la interdependencia entre infraestructuras.

Finalmente, y específicamente en el campo de las infraestructuras, el trabajo de Little (2012) para el International Risk Governance Council (IRGC) es particularmente relevante. Él analiza los paradigmático e icónico casos del gran apagón eléctrico conocido como Northeast Power Outage de 2003 en la costa este Norteamericana, el fallo del Sistema de defensas frente a inundaciones de la ciudad de Nueva Orleans en 2005, y el accidente de la central nuclear de Fukushima de 2011.

La principal conclusión de Little, tras hacer los preceptivos análisis de las causas raíz de cada uno de ellos, es que los sistemas complejos de infraestructuras civiles “no son intrínsecamente seguros” y que independientemente de lo bien que fueran diseñados, siempre existe un riesgo más o menos residual. Consecuentemente, para él, un nuevo paradigma es necesario para desarrollar e incentivar un cambio de valores culturales organizativos y promocionar actividades y acciones que permitan un cambio de dinámica entre los gestores de infraestructuras, puesto que hasta ahora los resultados son relativamente débiles.

2. EL CASO PARTICULAR DE LAS PRESAS Y EMBALSES

Dentro del campo de las infraestructuras hidráulicas, el sector de presas es relativamente un sector maduro en términos de aplicación de los principios de la gobernanza de riesgos, y en el que el autor del presente artículo ha podido desarrollar una dilatada actividad investigadora y aplicada.

Más específicamente, la actividad de “seguridad de presas” comprende un amplio espectro de conocimientos, actuaciones, prácticas profesionales y tareas de investigación que están genuinamente presentes independientemente de la escala del sistema de infraestructuras: desde modestas presas de abastecimiento urbano o riego a complejos sistemas de protección frente a inundaciones o de generación hidroeléctrica. Además, la seguridad de presas concierne a la práctica totalidad de los países, dado que la mayoría poseen presas en sus territorios, estando expuesta por tanto a todo tipo de condicionantes geopolíticos.

Halpin y Escuder (2015) habían a su vez documentado el hecho paradójico de que, al igual que la mayoría de los sectores vinculados a las infraestructuras civiles, muy pocas entidades han implementado sistemas de gobernanza de riesgos, independientemente de cuan obvios aparenten ser sus beneficios. De hecho la mayoría de los titulares, operadores y/o reguladores son “non-doers”, en el sentido de que no se han dotado de un marco racional de identificación, análisis, evaluación y gestión de riesgos.

Desde este punto de vista parece evidente que los factores clave que han impedido el éxito de numerosos programas en infraestructuras civiles son también una realidad para el caso de las grandes presas, si bien algunas organizaciones han conseguido implantarlos con éxito, no sin considerables esfuerzos. Siguiendo ahora el pictograma de la Figura 1, se pasa a describir el largo camino del sector

hacia la gobernanza de riesgos.

Las primeras publicaciones relacionando riesgos y seguridad de presas datan de hace casi cuarenta años (p.e. Baecher, Paté and de Neufville, 1980), si bien el impacto del paradigma de la gobernanza de riesgos en el sector no fue objeto sistemático de distintas publicaciones hasta la segunda mitad de los años noventa del siglo pasado y los primeros años del presente (p.e. Bowles, Anderson, and Glover 1998; ANCOLD 2003; Hartford and Baecher 2004, entre otros).

La intensidad de los debates y tribulaciones en el camino hacia la madurez de estos sistemas puede trazarse a través de otras tantas publicaciones y workshops internacionales (p.e. Escuder-Bueno et al. 2011).

A primera vista pudiera parecer que existe un entendimiento común del riesgo en el contexto de la seguridad de presas, e incluso la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD 2005) ha intentado reflejar ese entendimiento sobre los fundamentos del riesgo, su identificación, análisis, evaluación y gestión. Sin embargo, se pueden encontrar numerosos ejemplos de discusiones inacabadas sobre los aspectos más ontológicos todavía hoy en día.



Figura 1. El camino hacia el éxito en la implementación de sistemas de gobernanza de riesgos para infraestructuras. Fuente: adaptada de Escuder y Halpin (2016).

En cualquier caso, los avances en el sector son impresionantes, tal y como brevemente se resume a continuación, a partir del trabajo de recopilación de información llevado a cabo por el autor del presente artículo como parte de los trabajos de coordinación de la Guía de análisis de riesgos de presas de la Central Water Commission del Gobierno de la India (CWC, 2019).

Así, paralelamente a la aparición de una masa crítica de publicaciones a finales del siglo XX, diferentes grupos de trabajo e instituciones empiezan a aplicar técnicas de análisis de riesgos en el campo de la seguridad de presas en Estados Unidos, Australia, España y muchos otros países.

Algunos de los países y grupos líderes en dicha implementación han sido:

- Estados Unidos
  En los Estados Unidos, la primera institución que utilizó los principios de la gestión de riesgos en presas fue el Bureau of Reclamation (USBR 1997). Desde entonces, procedimientos informados en riesgo han sido utilizados para evaluar la seguridad de sus presas así como para proteger a la población aguas abajo de las potenciales consecuencias de su rotura, han servido también para priorizar recursos e inversiones y para justificar las rehabilitaciones necesarias.

Han utilizado métodos cuantitativos y un marco propio de recomendaciones de tolerabilidad que ha sido actualizado en esta década (USBR 2011) y armonizado con los empleados por otras agencias federales.

Desde 2005, the United States Army Corps of Engineers (USACE) y la Federal Energy Regulatory Commission (FERC) desarrollaron sus propias políticas de gestión de seguridad de presas sobre la base de las técnicas de análisis de riesgo (USACE, 2014 and FERC, 2016), en estrecha colaboración con el USBR.

Como explican (Escuder-Bueno y Halpin, 2016), el USACE opera y mantiene aproximadamente 700 presas, ha seguido un proceso adaptativo de aprendizaje para la implementación de la gobernanza de riesgos y se le reconoce en la actualidad una serie de capacidades, políticas y procedimientos que no son perfectos pero que transcurridos más de diez años han cambiado la cultura corporativa y formado a más de 100 ingenieros que toman decisiones en este nuevo marco de gobernanza.

- Australia

  En 2003, el Comité Nacional Australiano de Grandes Presas (ANCOLD) publicó sus "Guidelines on Risk Assessment" (ANCOLD, 2003). Estas guías desarrollan las distintas etapas de la gestión de riesgos (identificación de modos de fallo, análisis de riesgos, evaluación de riesgos, etc.) y explica cómo esos resultados pueden ser utilizados para priorizar actuaciones cuando se gestionan grupos de presas.

  Estas guías remarcan la importancia de combinar la gestión de riesgos con los tradicionales criterios de seguridad de presas basados en estándares pues, idealmente, el objetivo sería satisfacer tanto los mencionados estándares como las políticas de riesgos a la vez.

  Desde la publicación de la Guía en 2003, su aplicación ha evolucionado en algunos de los Estados de Australia, donde la seguridad de presas se regula precisamente a ese nivel, y se puede afirmar que el continuo desarrollo profesional en la materia ha supuesto un considerable apoyo en la gestión de la seguridad de estas infraestructuras (Barker 2011).

- España

  En España, la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) organizó en 2005 la Primera Semana Internacional sobre el Análisis de Riesgos aplicado a la Seguridad de Presas y Embalses (IWRDD), evento que contó con una amplia representación de profesionales de presas y que marcó el inicio de una dilatada investigación dentro del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA).

  La UPV organizaría posteriormente las ediciones de 2008 y 2011 de la IWRDD, esta última ya en colaboración con iPresas, compañía Spin-Off de la UPV, nacida con el objeto de impulsar la aplicación profesional de las técnicas de análisis de riesgos desarrolladas inicialmente como actividades de investigación dentro del IIAMA.

  Como ejemplo práctico de la aplicación en España del Análisis de Riesgos para la gestión de la seguridad de presas destaca la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) que desarrolló, en colaboración con iPresas, modelos de riesgo cuantitativos para sus 27 grandes presas. Dicho análisis, combinado con un tratamiento de la incertidumbre y con la evaluación de distintas medidas correctoras, ha proporcionado a la CHD una metodología para apoyar la toma de decisiones en seguridad de presas que permite priorizar y programar las actuaciones que deben llevarse a cabo por parte del mismo, de acuerdo con los criterios de viabilidad técnica, económica, social y ambiental, establecidos en la normativa vigente.

  Asimismo, en 2012, la publicación por parte del Comité Español de Grandes Presas (SPANCOLD, 2012) de la Guía Técnica de Seguridad de Presas Nº8, de Explotación de presas y embalses, con título "Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses" supone un hito reciente en el campo de la gestión de seguridad de presas. Este documento describe el proceso general para la aplicación del Análisis de Riesgos en presas

con el objetivo de informar en la toma de decisiones y la priorización de medidas de reducción del riesgo.

También relativamente reciente, el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos ha publicado el libro "Metodología para la evaluación del riesgo hidrológico de presas y priorización de medidas correctoras" (editado por I. Escuder y J. González en 2014), que pone el foco en la aplicación de análisis de riesgos con distintos grados de complejidad para informar la toma de decisiones respecto a modos de fallo vinculados a eventos hidrológicos.

- Otros países
  En los últimos años, otros países y entidades han desarrollado recomendaciones específicas en la materia, la mayoría siguiendo los pasos de sus predecesores en cuanto a la estructura general del proceso: identificación de modos de fallo, análisis cualitativo, análisis cuantitativo, evaluación de riesgos y priorización de inversiones. Algunos ejemplos son:
  - ✓ Reino Unido: Guide to risk assessment for reservoir safety management elaborada por la Environmental Agency (EA 2013).
  - ✓ Canada: Dam Safety Guidelines of the Canadian Dam Association (CDA 2013).
  - ✓ New Zealand: New Zealand Dam Safety Guidelines (NZSOLD 2015).
  - ✓ France: desde 2007, Francia ha desarrollado una legislación específica que promueve la identificación de modos de fallo y un análisis cualitativo además de otro semi-cuantitativo (MEDDE 2012).
  - ✓ China: las Chinese Dam Risk Assessment Guidelines proponen una primera clasificación de riesgo de todas las presas (Zhou et al. 2015).
  - ✓ Brasil: en la actualidad todas las presas Brasileñas están siendo clasificadas de acuerdo con una metodología de "screening" basada en riesgo mediante una metodología desarrollada por el Consejo Brasileño de Recursos Hídricos (CNRH 2012).
  - ✓ Sudáfrica: el Department of Water Affairs (DWA), utiliza un procedimiento basado en riesgo para informar la seguridad de sus presas (Reynolds and Barnardo-Viljoen 2014).
  - ✓ Argentina: desde 2017, el Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP) está desarrollando su propio procedimiento de gobernanza de riesgos (Dalmati et al. 2018).
  - ✓ Panamá: la Agencia Nacional de Seguridad de Presas (ANSP 2010) hace ya uso de los principales conceptos de la gestión de riesgos a nivel de clasificación de presas.
  - ✓ México: Una nueva normativa (CNA 2015) introduce el análisis de riesgo cuantitativo y recomendaciones de tolerabilidad para la evaluación de riesgos en presas.
  - ✓ Korea: Una larga investigación está culminando y se espera que dé lugar a unas guías de gobernanza de riesgos en seguridad de presas (Heo 2016).

3. TENDENCIA MARCADA POR LAS POLÍTICAS DE GESTIÓN DE RIESGO DEL BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO Y OTROS ORGANISMOS MULTILATERALES

A continuación, se presenta brevemente el ejemplo concreto un organismo multilateral de financiamiento que ya ha definido un sistema propio de evaluación de la efectividad de los sistemas de gobernanza del riesgo de desastres, el denominado iGOPP del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), tal y como se referenciaba en el primer apartado de este artículo.

Su política de gestión de riesgos de desastres instaurada en 2007 (GN-2354-5 de febrero de 2007) y las necesidades detectadas para su aplicación diez años después de la publicación de una Guía específica a tal efecto en 2008 (Disaster Risk Management Policy Guidelines) constituye un cuerpo conceptual y operativo muy importante, y supone un compromiso con una forma moderna e

inteligente de concebir, diseñar, construir y explotar proyectos de ingeniería civil.

Su propia complejidad conceptual y operativa supone, sin embargo, en primera instancia, una serie de dificultades que, lejos de condicionar la idoneidad o la oportunidad de aplicar la política, supone un necesario aprendizaje sobre la forma de aplicarla.
El BID se compromete en dicha política a seguir las mejores prácticas en cada sector y subsector en cuanto a la identificación, análisis y evaluación del riesgo de manera que se pueda constatar si este es aceptable. Independientemente de lo anterior, en ningún caso se financiarán proyectos que den lugar a un riesgo superior al existente con anterioridad a su construcción (se entiende que en cualquier fase de su ciclo de vida), riesgo en términos humanos, económicos o ambientales fruto de la interacción entre las amenazas naturales, la respuesta de las infraestructuras construidas frente a las mismas y las consecuencias del mal funcionamiento o fallo de las mismas.

La Figura 2 muestra el impacto evaluado por el propio BID del coste anual de los desastres naturales y su interacción con las infraestructuras existentes en algunos países de Latinoamérica desde 1940 hasta 2009.

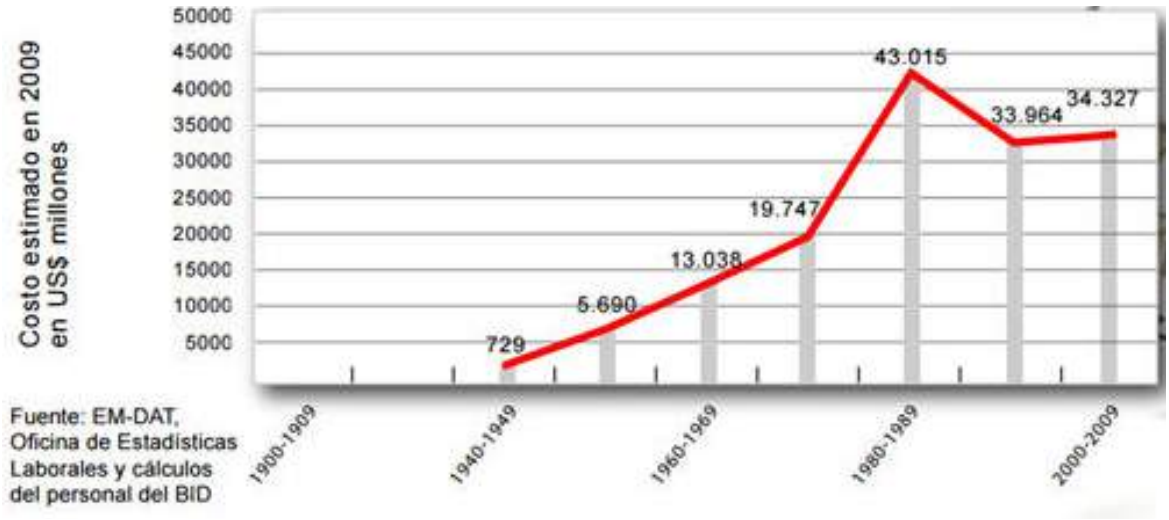


Figura 2. Coste estimado por el BID del conjunto de desastres originados por eventos naturales en Latinoamérica. Fuente: Midiendo riesgo de desastres (BID, 2015).

Más allá del caso particular del BID, especialmente relevante por los motivos que se han argumentado, vale la pena reforzar la utilidad y necesidad de desarrollar sistemas de gobernanza de riesgos en infraestructuras a escala completamente global, y para ello se puede hacer uso de una serie de datos publicados por la United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Disaster Statistics en 2016, con información recopilada a lo largo de una década 2005-2014 (Figura 3) así como en el documento igualmente editado por Naciones Unidas en 2015 bajo el título Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (Figuras 4, 5 y 6).

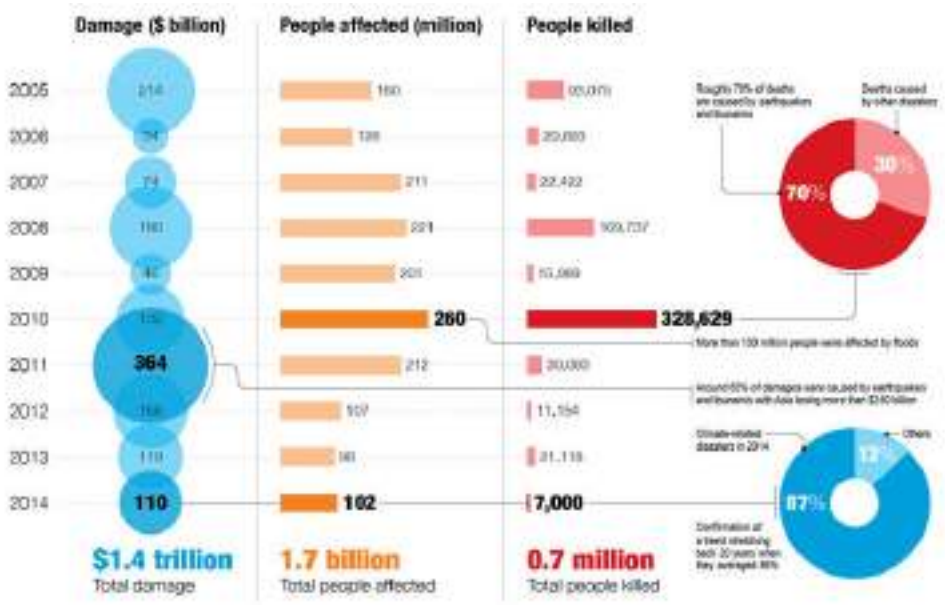


Figura 3. Impacto de los desastres naturales a escala mundial en dólares norteamericanos entre 2005 y 2014. Fuente: United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Disaster Statistics, 2016.



Figura 4. Impacto de los desastres naturales a escala mundial en términos de pérdidas anualizadas promedio expresadas en millones de dólares norteamericanos por año). Fuente: UN Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, 2015.



Figura 5. Impacto de los desastres naturales a escala mundial en términos de pérdidas anualizadas promedio expresadas en millones de dólares norteamericanos por año en términos del porcentaje de la inversión en infraestructuras y otras medidas de protección. Fuente: UN Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, 2015.

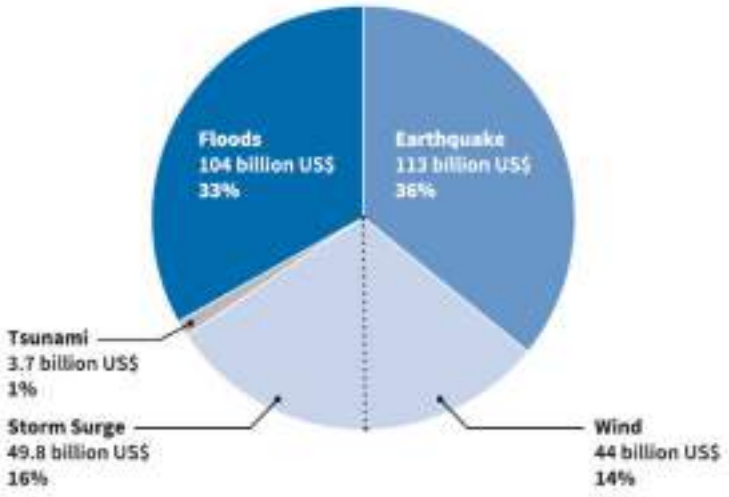


Figura 6. Impacto de los desastres naturales a escala mundial en billones de dólares norteamericanos entre 2005 y 2014 clasificados por el origen de la amenaza natural. Fuente: UN Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, 2015.

Como se observa, el impacto tanto en términos absolutos como en pérdidas promedio anualizadas es muy importante, está vinculado a la capacidad de inversión en medidas de protección (lo cual a su vez genera una inequidad a escala global) y las dos principales amenazas en términos de impacto son tanto las inundaciones como los sismos, amenazas que resultan especialmente relevantes para el caso de obras y aprovechamientos hidráulicos.

En este contexto cabe remarcar que el hecho de que el BID disponga de estas políticas tan avanzadas en Gestión de Riesgos de Desastres junto con la experiencia adquirida por distintos equipos en los últimos años en aplicaciones prácticas han cristalizado en un documento técnico cuyo resumen ejecutivo data de 2018 y cuya versión definitiva se publicó en 2019 bajo el título "Disaster and Climate Change Risk Assessment Methodology for IDB Projects: A Technical Reference Document for IDB Project Teams".

Este documento detalla la propuesta de un marco formal de aplicación de la Política de Gestión de Desastres del BID (véase el punto 1 del presente informe) tal y como se recoge en el esquema de la Figura 7.



Figura 7. Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático. Fuente: Executive Summary. Disaster and Climate Change Risk Assessment Methodology for IDB Projects: A Technical Reference Document for IDB Project Teams (2018).

En resumen, puede esperarse que en los próximos años los proyectos de infraestructuras hidráulicas, así como todo tipo de actuaciones de prevención frente a inundaciones se desarrollen en un marco formal que se nutre del análisis de riesgos en todo el ciclo de vida de los proyectos y que esto se traduzca en resultados más sostenibles y resilientes.

REFERENCIAS

- Abrahamsen, E.B. and Aven, T (2012). Why risk acceptance criteria need to be defined by the authorities and not the industry?. *Reliability Engineering and System Safety*, 105, 47-50. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.004
- ANSP. (2010). *Normas Para La Seguridad de Presas*. Autoridad Nacional de los Servicios Publicos de Panamá.

- Australian National Committee on Large Dams, ANCOLD. (2003). *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams, Hobart.
- Aven, T. and Renn, O. 2010. *Risk Management and Governance*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13926-0
- Baecher, G. B., Paté, M. E. and de Neufville, R. (1980). Risk of Dam Failure in Benefit-Cost Analysis. *Water Resources Research*, 16(3), 449-456.
- Barker, M. (2011). Australian Risk Approach for Assessment of Dams. 21st Century Dam Design – Advances and Adaptations, *Proceedings of the 31st Annual USSD Conference*, San Diego. US Society on Dams, Denver.
- BID (2007). GN-2354-5. *Política sobre Gestión de Riesgos de Desastres*.
- BID (2008). *Disaster Risk Management Policy Guidelines*.
- BID (2015). *Midiendo riesgo de desastres*.
- BID (2018). *Executive Summary: Disaster and Climate Change Risk Assessment Methodology for IDB Projects: A Technical Reference Document for IDB Project Teams*.
- BID (2019). *Disaster and Climate Change Risk Assessment Methodology for IDB Projects: A Technical Reference Document for IDB Project Teams*.
- Boholm, A., Corvellec, H. and Karlsson, M. (2012). The practice of risk governance: lessons from the field. *Journal of Risk Research*, 15(1), 1-20. https://doi.org/10.1080/13669877.2011.587886
- Bowles, D. S., Anderson, L. R. and Glover, T. F. (1998). The practice of dam safety risk assessment and management: its roots, its branches and its fruit. *Proceedings of Eighteenth USCOLD Annual Meeting and Lecture*. Buffalo, New York.
- CDA (2013). *Dam Safety Guidelines*. Canadian Dam Association.
- CNA (2015). *Proyecto de Norma Mexicana - Operación Segura de Presas - Parte 1 Análisis de Riesgo y Clasificación de Presas*. Comisión Nacional de Agua.
- CNRH (2012). *Resolução No. 143, de 10 de Julho de 2012*. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional de Recursos Hídricos.
- CWC (2019). *Guidelines for assessing and managing risk associated with dams*.
- Dalmati, Rodolfo, J. Facundo Souto, Florencia Zarauz, Ailín Pertierra, Ignacio Escuder-Bueno and Adrián Morales-Torres. (2018). Implementation of Risk Analysis to Inform Dam Safety from a Regulatory Perspective: Application to Cerros Colorados System (Neuquen, Argentina). *26th International Commission on Large Dams World Congress*. Viena.
- EA (2013). *Guide to Risk Assessment for Reservoir Safety Management*. Environment Agency. Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Escuder-Bueno, I., Matheu, E., Altarejos-García, L. and Castillo-Rodríguez, J. (2011). *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*. CRC Press.
- Escuder-Bueno, Ignacio and Eric Halpin. (2016). Overcoming Failure in Infrastructure Risk Governance Implementation: Large Dams Journey. *Journal of Risk Research*, 9877, 1-18.
- European Commission, EC. (2001). *European Governance: A white paper*. 25.7.2001. COM(2001) 428 final. Brussels.
- FERC (2016). *Risk Guidelines for Dam Safety - Interim Guide*. Federal Energy Regulatory Commission.
- Halpin, E. and Escuder, I. (2015). Smart governance of infrastructure programs: facing the next generation of challenges and succeeding. *Proceedings of the 25 ICOLD Congress*. Stavanger, Norway.
- Hartford, D. N. D. and Baecher, G. B. (2004). *Risk and uncertainty in dam safety*. Thomas Telford Ltd. CEA Technologies. Dam Safety Interest Group.
- Heo, Gun (2016). Schematic Development of Risk Analysis for Dam Safety. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers,* 58(2), 11-20.
- Inter-American Bank of Development, BID (2014). *iGOPP: Índice de Gobernabilidad y de*

Políticas Públicas en Gestión del Riesgo de Desastres. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. Nota Técnica IDB-TN-720.

- International Commission on Large Dams, ICOLD (2005). *Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications*. Committee on dam safety. Bulletin 130.
- International Organization for Standardization, ISO (2009). ISO 31000:2009. *Risk Management: Principles and Guidelines*.
- International Risk Governance Council, IRGC (2005). *Risk Governance: Towards an Integrative Approach. White Paper No. 1*. Geneva.
- Johnston, E. and Hansen, D. (2011). *Design Lessons for Smart Governance Infrastructures. Chapter in American Governance 3.0: Rebooting the Public Square?*. National Academy of Public Administration.
- Little, R.G. (2012). *Managing the risk of aging infrastructure*. International Risk Governance Council. Public Sector Governance of Emerging Risks, Infrastructure Case.
- Marks, N. (2014). *Governance, Risk Management and Audit. The risk of ineffective risk management*. https://normanmarks.wordpress.com/2014/10/11/the-risk-of-ineffective-risk-management/
- MEDDE (2012). *Guide de Lecture Des Etudes de Dangers Des Barrages*. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
- NZSOLD (2015). *New Zealand Dam Safety Guidelines*. New Zealand Society on Large Dams. Professional Engineers New Zealand.
- Renn, O. (2008). *Risk Governance: Coping with Uncertainty in a Complex World*. Earthscan.
- Reynolds, Sonel, and Celeste Barnardo-Viljoen. (2014). Evaluating the Prioritisation of South African Dams for Rehabilitation with Special Focus on Risk to Human Lives. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 56(3), 14-24.
- Spanish National Committee on Large Dams, SPANCOLD (2012). *Risk analysis applied to management of dam safety*. Technical Guide 8. Vol. 1. Madrid.
- United States Army Corps of Engineers, USACE (2014). *Engineering and Design: Safety of Dams- Policies and Procedures*. ER 1110-2-1156. Washington DC.
- United States Bureau of Reclamation, USBR (1997). *Guidelines for Achieving Public Protection in Dam Safety Decision Making*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- United States Bureau of Reclamation, USBR (2011). *Dam Safety Public Protection Guidelines - A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making*. United States Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- UN (2015). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*.
- UN (2016). *Disaster Statistics*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Van Asselt, M. B. A. and Renn, O. (2011). Risk governance. *Journal of Risk Research*, 14(4), 431-449. https://doi.org/10.1080/13669877.2011.553730
- Wilke, H. (2007). *Smart Governance: Governing the Global Knowledge Society*. University of Chicago Press, Chicago, USA.
- Zhao, X., Hwang, B. and Low, S. P. (2015). *Enterprise risk management in International Construction Operations*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-287-549-5.
- Zhou, Xingbo, Jianping Zhou, Xiaohu Du and Shouyi Li (2015). Study on Dam Risk Classification in China. *Water Science & Technology: Water Supply*, 15(3), 483.

LA ADAPTACIÓN COMO HERRAMIENTA CLAVE PARA DISMINUIR LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN

Francisco Javier Sánchez Martínez
Subdirector General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
fsmartinez@miteco.es

Mónica Aparicio Martín
Jefa de área en la Subdirección General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
maparicio@miteco.es

Juan Francisco Arrazola Herreros
Jefe de servicio en la Subdirección General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
fjarrazola@miteco.es

RESUMEN

Los actuales desafíos ecológicos exigen cambios colectivos e individuales, a diferentes escalas, que incorporen la incertidumbre como material de trabajo y promuevan sociedades más resilientes. Impulsadas por graves episodios como las inundaciones fluviales en Europa o los huracanes Sandy y Katrina en Estados Unidos, ciudades de todo el mundo reconocen en la actualidad la vulnerabilidad ante futuros desastres y desarrollan ambiciosas estrategias integrales para mejorar su resiliencia. Agrupando a equipos multidisciplinares e implicando a nuevos actores, se planifican respuestas de forma proactiva desde el paisaje, la ciudad y el edificio, final del recorrido. En España, las inundaciones constituyen el fenómeno natural que genera los daños más graves, en términos tanto materiales como de vidas humanas. En este contexto, la adaptación al riesgo puede contribuir significativamente a disminuir las pérdidas económicas y a mejorar la seguridad de los usuarios. Tras impulsar las Guías de adaptación al riesgo de inundación, desde la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se están desarrollando una serie de Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación. Sus objetivos son trasladar el contenido de las guías redactadas a ejemplos concretos, identificar líneas generales de actuación en función del uso, ubicación y características constructivas de los edificios, y recopilar buenas prácticas ya implementadas para facilitar su divulgación.

1. ANTECEDENTES



Figura 1. Inundación en Los Alcázares, septiembre de 2019. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.

La Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y la gestión de los riesgos de inundación, tiene por objetivo establecer un marco destinado a "reducir las consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a las inundaciones". Otras directivas europeas vinculadas a la gestión fluvial como la Directiva Marco del Agua y la Directiva Hábitats plantean un amplio escenario de complementariedad para una gestión integral del riesgo de inundación.

En España, el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, constituye la transposición al ordenamiento jurídico estatal de la Directiva de Inundaciones. Por su parte, el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifican, entre otros, el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y el Reglamento de Planificación Hidrológica, identifica las actividades vulnerables frente a avenidas y fija ciertas limitaciones básicas al uso de las zonas inundables.

El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) es un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa. Su eje central, el visor cartográfico de zonas inundables, facilita el acceso ciudadano a la información relativa a la inundabilidad.



Figura 2. Entorno de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón: mapa de peligrosidad y mapa de riesgo a las actividades económicas T=500. Fuente: SNCZI.

Los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) son los documentos de referencia para la administración y la sociedad en general en la gestión de avenidas. Su contenido esencial es el programa de medidas, incluyendo aquellas en materia de ordenación territorial y urbanismo. Estas contemplan la elaboración de guías técnicas para reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

La *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*, elaborada dentro de un convenio de colaboración suscrito entre la Dirección General del Agua y el Consorcio de Compensación de Seguros, ofrece información relativa a la gestión del riesgo, el diseño de edificaciones, medidas de protección civil y medidas de autoprotección para minimizar los daños que producen las inundaciones.

De forma complementaria, en el marco del *Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España (Plan PIMA Adapta)*, la Dirección General del Agua, con la asistencia técnica de TRAGSATEC, ha elaborado las siguientes guías, que se están aplicando a diferentes casos piloto representativos:



Figura 3. Guías de adaptación al riesgo de inundación. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

- *Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras,* para ayudar a identificar los daños directos o indirectos que una inundación puede causar en una ciudad o en su entorno, de forma que se puedan realizar actuaciones que incrementen la resiliencia.

- *Sistemas urbanos de drenaje sostenible,* para profundizar en las causas y consecuencias de las inundaciones a nivel urbano y conseguir una mejor gestión de las aguas pluviales mediante el uso de SUDS.

- *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables,* para exponer criterios constructivos aplicables a nuevos edificios en zona inundable y opciones de mejora para los ya construidos.

- *Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas,* para dar a conocer las consecuencias de las inundaciones y fomentar la reducción del riesgo en entornos agrícolas y ganaderos.

2. RESILIENCIA FRENTE AL RIESGO DE INUNDACIÓN Y ENFOQUE MULTIESCALAR

El concepto de resiliencia refleja la capacidad de adaptación de la sociedad o los ecosistemas a los riesgos que puedan soportar.

En el contexto de la emergencia climática, la Agenda 2030 constituye una hoja de ruta eficaz para abordar la resiliencia con un enfoque amplio que contribuya a salvaguardar el medio ambiente, la salud y la seguridad de la ciudadanía. Adoptada en 2015 por los jefes de Estado y de Gobierno de los países miembros de Naciones Unidas, propone 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que pueden ser implementados mediante una gestión integral del riesgo de inundación.



Figura 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 11, 13 y 15. Fuente: Organización de las Naciones Unidas.

Por su parte, la Agenda Urbana Española, tomada en consideración por el Consejo de Ministros el 22 de febrero de 2019, propone un Decálogo de Objetivos Estratégicos en el que la resiliencia y su capacidad para generar nuevos beneficios juegan un papel esencial.

Con el objetivo de reforzar la participación y la responsabilidad compartida, plantea además poner en marcha una gobernanza del riesgo que implique a todos los interesados (expertos, gobiernos, sector privado, sociedad civil, etc.) en la deliberación y en la propia gestión.



Figura 5. Decálogo de Objetivos Estratégicos de la Agenda Urbana Española. Fuente: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

Las estrategias que integran gestión de inundaciones y sostenibilidad ambiental permiten reducir el riesgo manteniendo o aumentando los beneficios que aportan los ríos, pero ante situaciones heredadas, como núcleos de población consolidados o infraestructuras estratégicas en zonas vulnerables, es preciso completarlas con mecanismos de protección (Ollero, 2014). Este enfoque multiescalar de la resiliencia plantea una interacción entre el sistema ecológico y el sistema social basada en la protección conjunta de los ecosistemas y las actividades humanas, para mantener la funcionalidad de ambos generando además nuevos valores. En este contexto, reforzar la resiliencia significa planificar procesos lentos a escala global y estar preparados para perturbaciones rápidas a escala local (García García, 2016).

A escala urbana, además de disponer de normativa y herramientas para gestionar el riesgo de forma coordinada, las ciudades y comunidades deben también evolucionar hacia nuevos planteamientos e ideas que permitan mejorar su resiliencia y afrontar los futuros condicionantes hidrometeorológicos, combinando adaptación y mitigación.

En este contexto, las infraestructuras verdes y azules son soluciones multifuncionales basadas en la naturaleza, útiles en la gestión del riesgo de inundación, que aportan múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales. Con esta perspectiva se desarrolla la planificación y gestión hidrológica que Vitoria-Gasteiz está llevando a cabo para solucionar sus problemas de inundabilidad y saneamiento (Marañón, 2019).

Por su parte, los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) son una herramienta preventiva de gestión del agua de lluvia que contribuye a minimizar los efectos de las inundaciones. Su estrategia se basa en dos objetivos principales: reducir la cantidad de agua que llega al punto final de vertido, y mejorar la calidad del agua que se vierte al medio natural. Municipios como Benaguasil (Valencia), galardonado en 2015 con el Premio Ciudad Sostenible a nivel nacional en la categoría Gestión de Agua, demuestran que existen medios y técnicas para dar un nuevo enfoque al tratamiento del agua de lluvia en la ciudad, integrando la gestión de escorrentías en el paisaje urbano (Perales-Momparler y Valls-Benavides, 2013).



Figura 6. Infraestructura verde urbana de Vitoria-Gasteiz. Fuente: Centro de Estudios Ambientales, Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz.

A escala arquitectónica no es posible evitar las inundaciones, pero sí reducir significativamente sus efectos. En este sentido, las administraciones locales y la iniciativa individual pueden ejercer un papel decisivo en la prevención impulsando la reducción de la exposición, los criterios constructivos resilientes y las medidas de autoprotección.

En las nuevas construcciones en zonas de riesgo, resulta importante considerar la posibilidad de implementar medidas compensatorias y albergar usos compatibles con la inundación. Al incorporar criterios de transparencia hidráulica (edificaciones en sentido de la corriente, elevación sobre pilotes, alteraciones topográficas, espacios públicos que ralenticen y drenen el agua, etc.) se permite el paso libre del flujo sin obstruir su movimiento natural. Así, el barrio de Matra en Romorantin-Lanthenay (Francia) se anticipa en su diseño a la posible presencia del agua, contribuyendo a la mejora de la percepción del riesgo en lugar de ocultarlo (CEPRI, 2014).

Para edificios ya construidos en zonas de riesgo, existen diversas medidas de adaptación de carácter paliativo orientadas a reducir la vulnerabilidad frente a las inundaciones. Las más destacadas son aquellas orientadas a evitar el contacto del agua con el edificio, impedir su entrada y minimizar los daños una vez en el interior (FEMA, 2014).



Figura 7. Cité Fluviale de Matra (Romorantin-Lanthenay, Francia). Fuente: CEPRI / Éric Daniel-Lacombe.

3. CASOS PILOTO DE ADAPTACIÓN AL RIESGO DE INUNDACIÓN: METODOLOGÍA

Los objetivos de los *Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación* son trasladar el contenido de las guías redactadas a ejemplos concretos, identificar líneas generales de actuación en función del uso, ubicación y características constructivas de los edificios, y recopilar buenas prácticas ya implementadas para facilitar su divulgación.

En coordinación con las diferentes demarcaciones hidrográficas, se han seleccionado usos muy diversos (sanitario, institucional, docente, industrial y patrimonio cultural) en distintos contextos geográficos. Paralelamente, en el marco de la *Estrategia Ebro Resilience*, se está analizando una serie de explotaciones agrícolas y ganaderas situadas en el eje medio del Ebro para conocer su grado de resiliencia frente a inundaciones e identificar las medidas de prevención, protección y preparación más eficientes. La metodología empleada se desarrolla en 4 fases:

1. Caracterización del riesgo: se realiza mediante la recopilación de información cartográfica disponible en el SNCZI y datos sobre episodios de inundación previos. Se analizan el edificio, entorno o localidad estudiados y su contexto, y se realiza la correspondiente visita y entrevista con sus gestores y usuarios.

2. Diagnóstico de la vulnerabilidad: se identifica la procedencia y principales puntos de entrada de agua, así como los daños potenciales que generaría una inundación en situación actual.
3. Propuesta de adaptación: se exponen diversas medidas generales de autoprotección para proteger a las personas, la edificación y su equipamiento, así como actuaciones recomendadas si se espera una inundación en la zona y se dispone de tiempo de reacción.

Se distinguen cuatro tipos de acciones para mitigar los daños en la edificación: EVITAR que el agua alcance el edificio; RESISTIR la entrada de agua en el edificio, una vez que ha llegado al exterior del mismo; TOLERAR la entrada de agua en el edificio, pero tomando las medidas necesarias para minimizar los daños; y RETIRAR el uso cuando el riesgo es demasiado elevado.

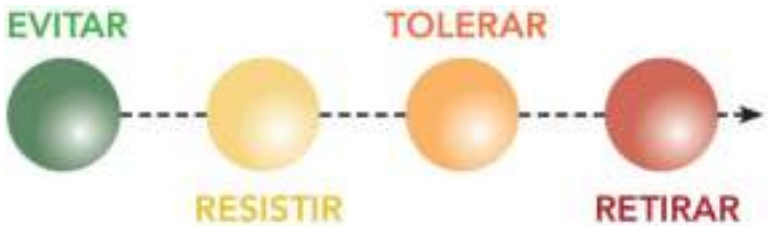


Figura 8. Medidas orientadas a la mitigación de daños en la edificación. Fuente: Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones. Dirección General del Agua y Consorcio de Compensación de Seguros.

La medida más habitual es el empleo de barreras temporales. Para ser efectivas, deberán cumplir una serie de requisitos: altura superior a la máxima cota de inundación prevista, estanqueidad, resistencia tanto a la presión del agua como al impacto de elementos arrastrados y disponibilidad tanto de tiempo como de recursos suficientes para su instalación.



Figura 9. Ejemplos de barreras temporales. Desmontables (Fuente: CAG Canalizaciones), apilables (Fuente: Flood Control International), abatibles (Fuente: Aggéres), e hinchables (Fuente: Tandem HSE).

A su vez, se diferencian tres tipos de acciones para mitigar los daños en el equipamiento: ELEVAR (subir el elemento vulnerable por encima de la cota inundable) REUBICAR (trasladarlo a una zona no expuesta) y PROTEGER (mantener su ubicación tomando las medidas necesarias para limitar el daño).

4. Valoración económica: se realiza un análisis beneficio/coste orientativo con el fin de trasladar la conveniencia de la inversión, aplicando la metodología descrita en la *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*.

El cálculo se realiza considerando tanto los daños en el edificio y su equipamiento como los derivados del cese de la actividad. Se evalúan las pérdidas en función del porcentaje de afección para 0.5, 1.5 y 3 metros de altura de calado. Con esta información, mediante una regla proporcional, se consideran diferentes hipótesis de riesgo, atendiendo a los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, y sus respectivos calados. Aplicando un modelo matemático que integra los daños y sus frecuencias, se obtiene el daño anual medio, y se multiplica para obtener las pérdidas potenciales acumuladas en 30 años. Con estos condicionantes, se plantean diferentes estrategias preventivas y su coste estimado de

ejecución. Por último, se calcula el daño residual o valor estimado de los daños tras implementar el paquete de medidas, y se estudia la reducción del riesgo y la relación beneficio/coste que ofrece cada alternativa.

4. CASOS PILOTO DE ADAPTACIÓN AL RIESGO DE INUNDACIÓN: EJEMPLOS

Se exponen a continuación los siguientes casos piloto representativos:

4.1. Resiliencia urbana frente al riesgo de inundación: Fraga (Huesca)

Fraga (Huesca, 14.979 habitantes) es un claro ejemplo de ocupación urbana de la llanura de inundación. La localidad ha registrado avenidas recurrentes, entre las que destaca el episodio de 1982, así como eventos recientes de menor intensidad en 2010, 2013 y 2018. Para dar respuesta a esta situación, la Modificación Aislada Nº50 del Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Fraga introduce limitaciones relativas al riesgo de inundación en la normativa municipal.

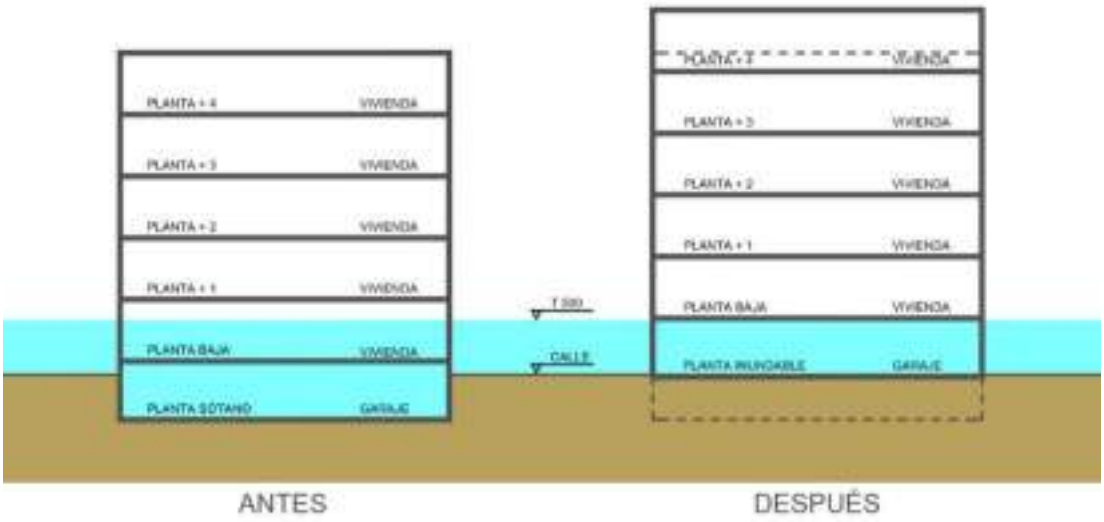


Figura 10. Regulación de la planta inundable establecida en la Modificación Nº50 del PGOU. Fuente: Ayuntamiento de Fraga.

En este caso piloto se emplea la metodología recogida en la guía de *Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras*. A partir de la información cartográfica disponible en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) se obtiene el inventario de redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras de Fraga. Su superposición con los mapas de peligrosidad disponibles en el SNCZI permite obtener una visión global de las necesidades de adaptación de la localidad y detectar aquellos elementos críticos cuya inoperatividad puede poner en peligro el funcionamiento del resto de la red.

Por otra parte, aplicando los conceptos de la guía de *Sistemas urbanos de drenaje sostenible*, se identifican diversos elementos del paisaje que pueden integrarse en el desarrollo urbano con criterios de conectividad ecológica, articulando diferentes aprovechamientos desde una visión de infraestructura verde y azul, y se proponen nuevos usos compatibles con la inundabilidad en las zonas con mayor riesgo.

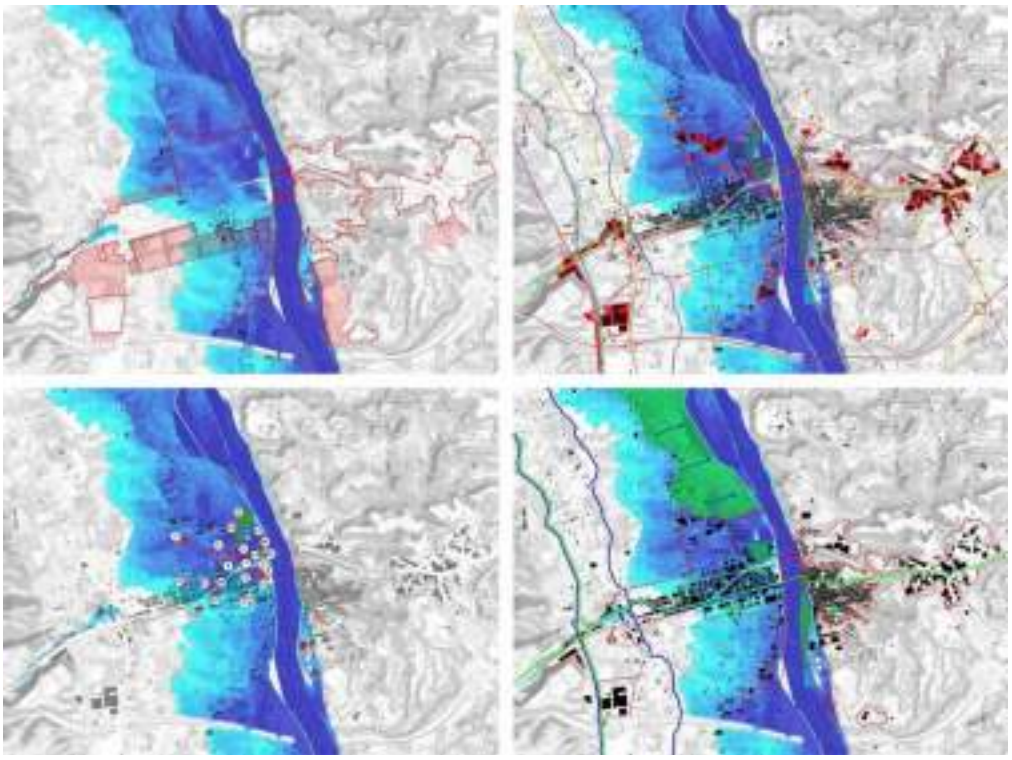


Figura 11. Resiliencia urbana en Fraga: análisis gráfico. Fuente: elaboración propia a partir de CNIG y SNCZI.

Existe además un elevado número de equipamientos situados en zona inundable, que pueden presentar aglomeraciones de personas y dificultar las tareas de evacuación en caso de emergencia, por lo que deben establecer sus propios planes de autoprotección. En concreto, edificios de uso sanitario, docente o residencial público han de ser objeto prioritario de adaptación dada la vulnerabilidad que plantea su uso y las características de sus ocupantes.

4.2. Hospital-Residencia Recoletas (Cuenca)

El Hospital-Residencia Recoletas se sitúa en el meandro del río Júcar a su paso por Cuenca, una zona con frecuentes inundaciones y variaciones del nivel del río. Completando el *Proyecto de disminución del riesgo de inundación y mejora del estado ecológico de los ríos Júcar y Moscas a su paso por Cuenca*, que plantea el retranqueo de la mota de la margen derecha para ceder espacio al río, el caso piloto tiene por objetivo reducir el riesgo de inundación en el edificio aplicando los conceptos recogidos en la guía de *Recomendaciones para la construcción y rehabilitación de edificaciones en zonas inundables*.

La visita permite identificar los posibles puntos de entrada de agua y los daños potenciales que provocaría una avenida. En primer lugar, la red general de saneamiento se sitúa a una cota similar a la de la lámina de agua del río, de forma que durante las crecidas se produce su colapso y el reflujo de aguas residuales. Las rejillas de ventilación situadas en el pavimento exterior, los huecos en fachada vulnerables a la rotura y entrada del agua por presión hidrostática o impacto de elementos arrastrados, así como las rampas de acceso a los sótanos, son otros puntos que requieren adaptación. Por otra parte, existen diversas instalaciones que se verían comprometidas en caso de inundación, inutilizando los servicios vitales del centro.

La implantación de sistemas antirretorno soluciona la problemática vinculada al saneamiento. Adicionalmente, se propone la construcción de muretes de protección perimetral y antepechos, así

como la instalación de compuertas hidráulicas abatibles integradas en el pavimento. Por último, se requiere el traslado a plantas superiores de las instalaciones eléctricas, las instalaciones de climatización y agua caliente sanitaria, el depósito de oxígeno y otros equipamientos vulnerables.

La nueva mota protege el edificio hasta la inundación del periodo de retorno de 25 años. Para crecidas superiores, es preciso acometer medidas de adaptación complementarias. Los daños estimados que generaría una avenida que alcanzase el edificio se estiman en 920.000 euros, mientras que el coste orientativo de las medidas es de 197.000 euros.

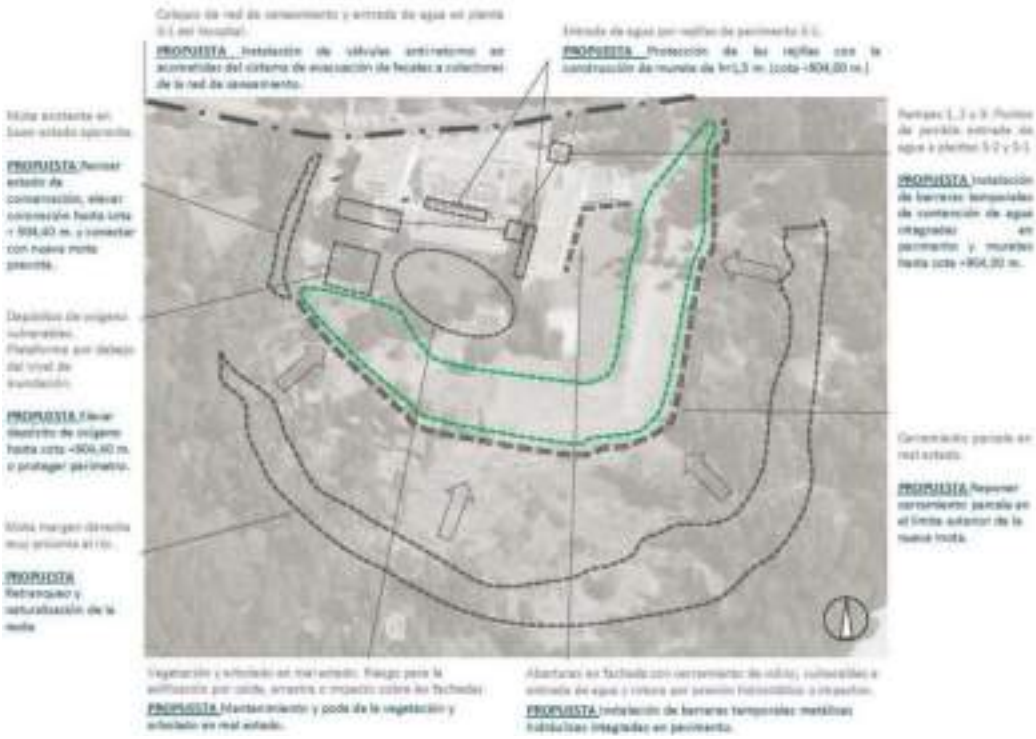


Figura 12. Caso piloto en Cuenca: esquema resumen de la propuesta. Fuente: elaboración propia.

4.3. Ayuntamiento de Cebolla (Toledo)

El municipio de Cebolla (Toledo, 3.263 habitantes) ha sufrido a lo largo de la última década numerosos episodios de inundación. El predominio aguas arriba de terrenos de cultivo de olivos e higueras, con fuerte pendiente y sin medidas de control de la escorrentía y la erosión, origina cambios drásticos en la dinámica de los cauces. Por otra parte, la canalización subterránea del arroyo Sangüesa y su falta de capacidad de conducción a través del recorrido urbano genera, en situaciones de aumento del caudal de forma precipitada, la acumulación de elementos que provocan su obstrucción y desbordamiento. Destaca, por su gravedad, el evento del 8 de septiembre de 2018, cuya siniestralidad supuso para el Consorcio de Compensación de Seguros la apertura de 173 expedientes y un coste de 639.180,28 euros.

El edificio del Ayuntamiento de la localidad se sitúa en su calle principal, donde la elevada pendiente provoca que las aguas desbordadas discurran a gran velocidad. Se trata de un edificio sencillo, de muros de carga de fábrica de ladrillo y forjados de madera, pero en él se activan determinados protocolos de emergencia en caso de inundación, por lo que su inoperatividad podría generar daños indirectos en la actividad del municipio.

Asumiendo que la posible avenida provocará el contacto del agua con la fachada del edificio, se propone resistir la entrada de agua mediante barreras temporales en los seis accesos al edificio. Una

posible solución es el empleo de dispositivos compuestos por un marco de acero que se expande en el plano horizontal y vertical, rodeado de una funda de neopreno que forma un sello estanco. Estos elementos resultan de fácil y rápida colocación y retirada, y se adaptan a un rango de medidas. Requieren un ajuste para asegurar la impermeabilidad, pero no precisan obra previa.

Aplicando la metodología descrita en las guías, que aúna los daños y sus frecuencias, las pérdidas acumuladas en 30 años se estiman en más de 80.000 euros. El coste orientativo del programa de medidas es de 7.500 euros, lo que supone una relación beneficio/coste de 10,7.

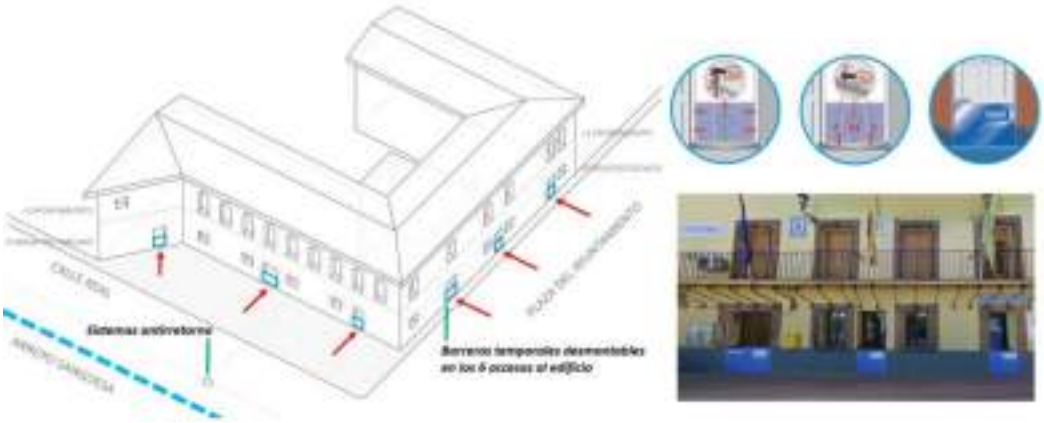


Figura 13. Caso piloto en Cebolla: esquema resumen. Detalle: barreras desmontables y ejemplo de aplicación. Fuente: elaboración propia y CAG Canalizaciones.

SITUACIÓN ACTUAL	**T=10**	**T=100**	**T=500**
Altura de agua (m)	0,25	0,4	0,5
Probabilidad anual	0,1	0,01	0,002
Daño	14.750,00 €	23.600,00 €	29.500,00 €
Daño incremental	737,50 €	1.725,75 €	212,40 €
Daño anual medio			2.675,65 €
Daño 30 años			80.269,50 €
PROPUESTA DE ADAPTACIÓN			
BARRERAS TEMPORALES	4 barreras desmontables 1 x 0.68 m		3.000 €
	2 barreras desmontables 1.5 x 0.68 m		2.500 €
INSTALACIONES	Sistemas antirretorno en sanitarios		2.000 €
COSTE ESTIMADO TOTAL €			**7.500 €**
Reducción teórica del riesgo			**100%**
Beneficio/Coste			**10,7**

Tabla 1. Caso piloto en Cebolla: análisis beneficio/coste. Fuente: elaboración propia.

4.4. Ayuntamiento de Los Alcázares (Murcia)

El municipio de Los Alcázares (Murcia, 15.674 habitantes), situado en la ribera del Mar Menor, ha sufrido recientemente varios episodios de inundación que han generado cuantiosos daños materiales y económicos. Su casco urbano se ubica en la zona de confluencia entre la Rambla de la Maraña y diversos ramblizos, que provocan la entrada de agua de manera muy laminada y dispersa, sin que exista un cauce principal definido. Además, el término municipal limita al sur con la Rambla del Albujón, desbordada en el episodio del 12 de septiembre de 2019. La alteración antrópica del paisaje,

vinculada a la agricultura y el urbanismo, ha incrementado la vulnerabilidad de la localidad ante el riesgo de inundación. La situación se ve agravada por fenómenos como las depresiones aisladas en niveles altos (DANA), típicos en el ámbito mediterráneo, pero que podrían incrementar su frecuencia y virulencia a consecuencia del cambio climático. Esta compleja problemática requiere estrategias integrales que aborden la resiliencia a diferentes escalas (adaptación de edificios, obras hidráulicas, infraestructuras verdes y azules, etc.) y contribuyan además a la protección y recuperación del Mar Menor.

Los Alcázares cuenta con diversos equipamientos públicos situados en zona inundable. Entre ellos destaca el edificio del Ayuntamiento de la localidad, ya que experimentó daños cercanos a 1 millón de euros en el episodio de septiembre de 2019, la mayor parte de los cuales se concentró en las dos plantas de aparcamientos subterráneos.

La propuesta se basa en la instalación de barreras temporales en los accesos al aparcamiento. Se plantea el uso de paneles ligeros de aluminio de 20 centímetros colocados entre guías y soportes incrustados en una base de hormigón. Para su instalación se apilan y quedan sellados de forma automática, ofreciendo máxima seguridad y permitiendo alcanzar cotas elevadas. Se propone también el empleo de dispositivos de sellado temporal en los huecos de ventilación y sistemas antirretorno en la acometida de la red de saneamiento, además de una serie de medidas complementarias para el edificio adyacente, de uso comercial y hotelero, con el que se comparte el aparcamiento.

La afección a los aparcamientos subterráneos es un fenómeno recurrente en los episodios de inundación, y los daños son muy elevados independientemente de la altura de calado alcanzada en el exterior. El análisis beneficio/coste arroja resultados muy favorables: una inversión estimada en 55.000 euros evitaría daños potenciales superiores a los 4 millones de euros para un periodo de 30 años, lo que supone una relación beneficio/coste de 77,9.

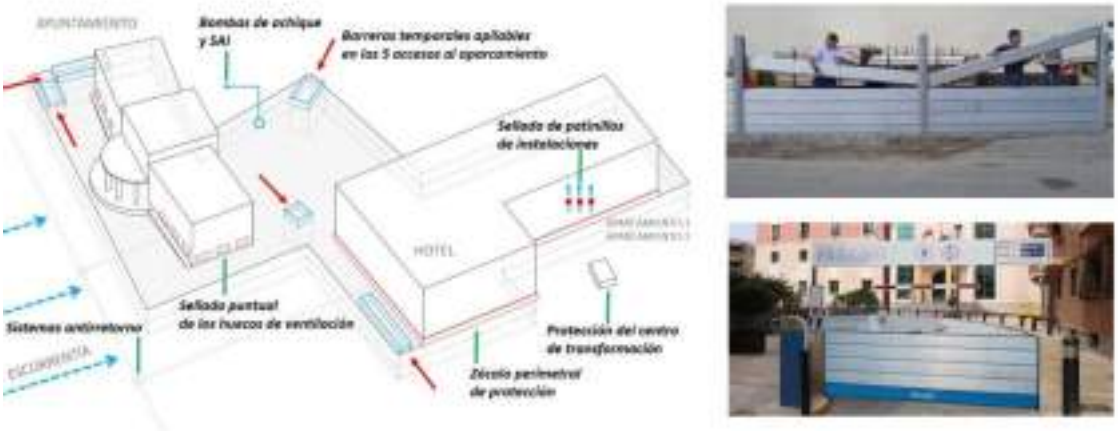


Figura 14.
Caso piloto en Los Alcázares: esquema resumen. Detalle: barreras apilables y ejemplo de aplicación. Fuente: elaboración propia y CAG Canalizaciones.

SITUACIÓN ACTUAL	T=10	T=100	T=500
Altura de agua (m)	0,2	0,5	0,8
Probabilidad anual	0,1	0,01	0,002
Daño	964.600,00 €	964.600,00 €	964.600,00 €
Daño incremental	48.230,00 €	86.814,00 €	7.716,80 €
Daño anual medio			142.760,80 €
Daño 30 años			4.282.824,00 €
PROPUESTA DE ADAPTACIÓN			
BARRERAS TEMPORALES	3 barreras apilables 4.5 x 1 m accesos vehículos		30.000 €
	2 barreras apilables 2 x 1m accesos peatonales		10.000 €
SELLADO PUNTUAL	24 dispositivos de sellado puntual huecos ventilación		12.000 €
INSTALACIONES	Válvula antirretorno en acometida		3.000 €
COSTE ESTIMADO TOTAL €			**55.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**100%**
Beneficio/Coste			**77,9**

Tabla 2. Caso piloto en Los Alcázares: beneficio/coste. Fuente: elaboración propia.

4.5. Instituto de Educación Secundaria Antonio Menárguez Costa (Los Alcázares, Murcia)

Los casos pilotos de adaptación al riesgo de inundación demuestran cómo mediante la identificación de los puntos de entrada de agua y la implementación de medidas relativamente sencillas y económicas pueden evitarse daños muy elevados. Asimismo, ofrecen soluciones escalables y replicables en escenarios similares. Tras abordar el edificio de Ayuntamiento de Los Alcázares, a propuesta de los técnicos municipales, conocedores de las necesidades locales, se desarrolla un segundo caso piloto en el Instituto Antonio Menárguez Costa, situado en una ubicación especialmente vulnerable. Además de las pérdidas materiales, los sucesivos eventos han provocado la interrupción de las actividades docentes del centro durante semanas.

Se proponen las siguientes alternativas de actuación:

La alternativa 1 (evitar), plantea la construcción de una barrera permanente y ofrece una reducción teórica del riesgo del 100%. Sin embargo, supone una mayor inversión económica (relación beneficio/coste 2:1), tramitación administrativa y obra. Implica además un impacto en el entorno urbano, al alterar la dinámica de la escorrentía y trasladar el problema hacia zonas no defendidas.

La alternativa 2 (resistir), plantea el uso de barreras temporales, económicas y de fácil instalación, con una relación beneficio/coste muy favorable (10:1). Esta opción resulta la más recomendable, si bien requiere adaptar el resto del recinto para hacerlo compatible con la inundabilidad. Además, está sujeta al buen funcionamiento de los protocolos de actuación y a la incertidumbre en los sistemas de alerta temprana.

La alternativa 3 (retirar), plantea nuevos criterios de diseño que prioricen la transparencia hidráulica, permitiendo el paso libre de la escorrentía sin obstruir su movimiento natural. De este modo, el edificio se anticipa a la presencia del agua, contribuyendo a la mejora de la percepción del riesgo en

lugar de ocultarlo. Para este caso concreto se descarta debido a que el centro es ya actualmente muy deficitario en espacio.

La metodología de estimación de daños empleada, que aúna pérdidas potenciales y periodos de retorno, arroja un daño acumulado en 30 años de 270.000 €. Sin embargo, los episodios sucedidos desde 2016 suponen unas pérdidas totales superiores a los 460.000 €, lo que refleja un agravamiento de la tendencia. Dado el carácter recurrente de estos eventos, y su mayor frecuencia e intensidad debido a los efectos del cambio climático, es preciso considerar las pérdidas potenciales que se producirían en ausencia de medidas de adaptación, lo que justifica la inversión. La viabilidad de las medidas de adaptación ha de valorarse en función de la relación entre los daños que pueden evitar y los costes derivados de su ejecución, además de las limitaciones técnicas y las necesidades programáticas.

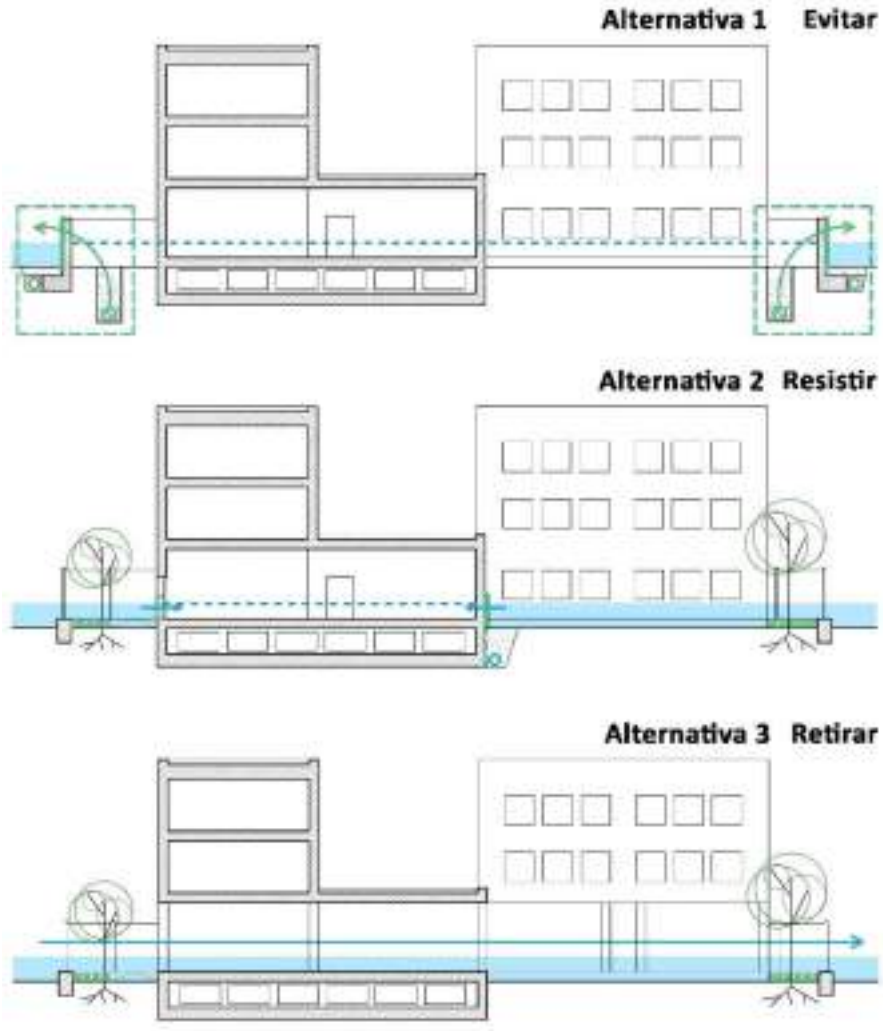


Figura 15. Caso piloto en Los Alcázares (Instituto): alternativas de adaptación. Fuente: elaboración propia.

SITUACIÓN ACTUAL	T=10	T=100	T=500
Altura de agua (m)	0,1	0,35	0,5
Probabilidad anual	0,1	0,01	0,002
Daño	33.000 €	107.000 €	162.100 €
Daño incremental	1.650,00 €	6.300,00 €	1.076,40 €
Daño anual medio			9.026,40 €
Daño 30 años			270.792,00 €
ALTERNATIVA 1: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**143.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**100,00%**
Beneficio/Coste			**1,89**
ALTERNATIVA 2: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**24.354 €**
Reducción teórica del riesgo			**87,33%**
Beneficio/Coste			**9,71**

Tabla 3. Caso piloto en Los Alcázares (Instituto): análisis beneficio/coste. Fuente: elaboración propia.

4.6. Edificio Polivalente de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón

El 11 de junio de 2018, el edificio polivalente de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón sufrió una inundación derivada del desbordamiento del río Peñafrancia, la afloración de agua del subsuelo y las fuertes precipitaciones in situ. Hasta 80 centímetros de agua inundaron la planta baja del edificio, generando unos daños estimados en 4,5 millones de euros. La ocupación y estrechamiento de la zona inundable, así como un modelo de urbanización y movilidad orientado al automóvil, que genera obstáculos adicionales e impermeabiliza el terreno, han generado condiciones de elevada vulnerabilidad.

Dada la complejidad del edificio, las posibles vías de entrada de agua son múltiples. Destaca el ascenso de agua a través de los patinillos de instalaciones debido a la inundación de la cámara bajo forjado sanitario, generando daños de gran magnitud distribuidos por toda la planta.

Se propone, de forma preferente, evitar que el agua alcance el edificio en caso de avenida mediante soluciones continuas que aíslen su perímetro. Si no fuesen viables, sería preciso inventariar todos los puntos vulnerables y desarrollar un complejo programa de medidas puntuales orientado a resistir la entrada de agua. En ese caso, si alguna de las intervenciones falla o aparecen puntos de entrada imprevistos, la propuesta quedaría invalidada. Por otra parte, dado que el edificio alberga una importante actividad de investigación y cuenta con equipos e instalaciones de coste muy elevado, es recomendable reubicar los elementos de valor elevado en plantas superiores no expuestas.

El uso de barreras temporales hinchables, de fácil instalación y almacenamiento, ofrece una relación beneficio/coste muy ventajosa (en torno a 200:1). Sin embargo, dependen del buen funcionamiento de los protocolos de actuación, que están muy condicionados por la elevada incertidumbre en los sistemas de alerta temprana debido a las características de la cuenca hidrográfica. Otra posibilidad, de coste superior, es la construcción de una barrera permanente que combine soluciones propias de la ingeniería con otras basadas en la naturaleza. Por último, una ampliación resiliente del edificio solucionaría el problema proporcionando además un aumento de la superficie útil de la escuela. Sin embargo, se descarta al estar sujeta a las limitaciones que se desprenden del Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre.



Figura 16. Ejemplos de barreras integradas en el paisaje. Fuente: Grupo Tragsa.

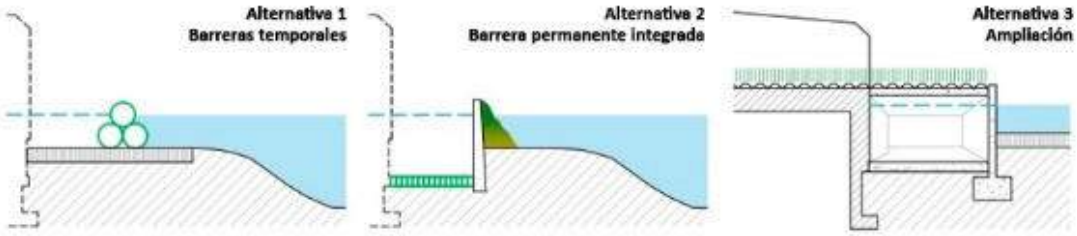


Figura 17. Caso piloto en Gijón: alternativas de adaptación. Fuente: elaboración propia.



Figura 18. Caso piloto en Gijón: daños estimados por escenario de inundación. Fuente: elaboración propia.

SITUACIÓN ACTUAL	T=10	T=100	T=500
Altura de agua (m)	1,7	2,6	3,5
Probabilidad anual	0,1	0,01	0,002
Daño	6.700.000 €	7.800.000 €	9.000.000 €
Daño incremental	335.000,00 €	652.500,00 €	67.200,00 €
Daño anual medio			1.054.700,00 €
Daño 30 años			31.641.000,00 €
ALTERNATIVA 1: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**96.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**60,35%**
Beneficio/Coste			**198,91**
ALTERNATIVA 2: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**363.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**60,35%**
Beneficio/Coste			**52,60**

Tabla 4. Caso piloto en Gijón: análisis beneficio/coste. Fuente: elaboración propia.

4.7. Polígono Industrial de Marrón (Ampuero, Cantabria)

El Polígono Industrial de Marrón, especializado en la fabricación de componentes para el sector de la automoción, ocupa el espacio comprendido entre el meandro del río Asón a su paso por Ampuero (Cantabria, 4.219 habitantes) y la vía de ferrocarril Santander-Bilbao, una ubicación muy vulnerable ante inundaciones. La combinación entre las intensas precipitaciones y el aumento de las temperaturas que acelera el deshielo en las montañas ha generado avenidas recurrentes en los últimos años, en concreto el 31 de enero de 2015 y el 23 de enero de 2019.

A raíz del grave episodio de 2015, la principal empresa del polígono ha implementado un plan de contingencia basado en la monitorización constante del cauce del río, la capacitación específica para los profesionales y una serie de medidas de autoprotección (barreras temporales desmontables, sistemas antirretorno, bombas de achique y otras acciones puntuales) que permitió evitar el cese de actividad durante el evento de 2019.

La problemática se vincula al desbordamiento y las filtraciones a través del muro de contención que bordea la margen izquierda del río a su paso por la localidad. Como complemento a las medidas implantadas, es preciso garantizar su impermeabilización, así como estudiar la posibilidad de recrecerlo, valorando las posibles repercusiones mediante las correspondientes pruebas de modelización hidráulica. Se plantea también la construcción de arquetones drenantes que faciliten las labores de bombeo y permitan achicar el agua de manera eficaz, así como el cierre perimetral del polígono mediante barreras temporales y permanentes, para evitar el agua procedente de otros puntos en caso de eventos extremos.



Figura 19. Actuaciones puntuales en fachada en el Polígono Industrial de Marrón. Fuente: Grupo Tragsa.

En el episodio de 2015, el agua alcanzó los 1.70 metros en el interior de las naves, generando en la principal empresa del polígono unas pérdidas totales estimadas en 25 millones de euros, incluyendo los daños en los edificios, maquinaria, instalaciones, mercancías y aquellos derivados del cese de actividad. El programa de medidas implantado ha tenido un coste de 145.000 euros: si bien la protección que ofrece no es total y exige un importante esfuerzo de planificación y autoorganización, plantea una relación beneficio/coste claramente favorable (en torno a 600:1).

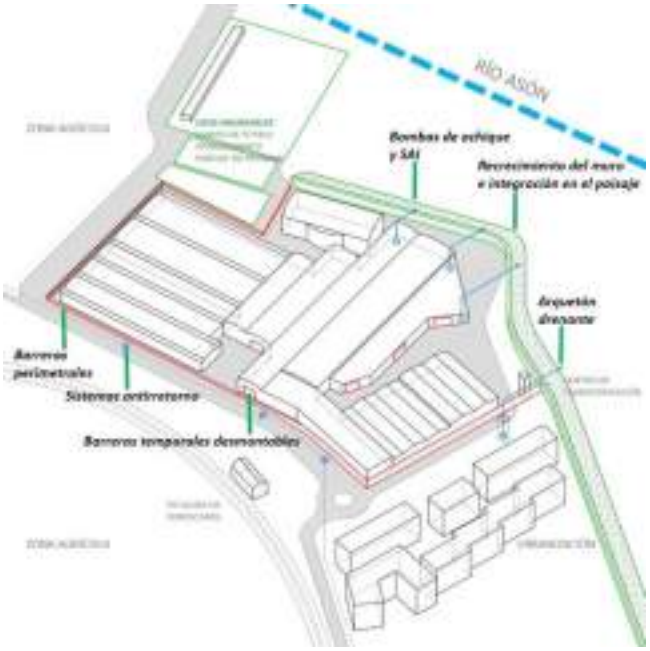


Figura 20. Caso piloto en Ampuero: esquema resumen. Fuente: elaboración propia.

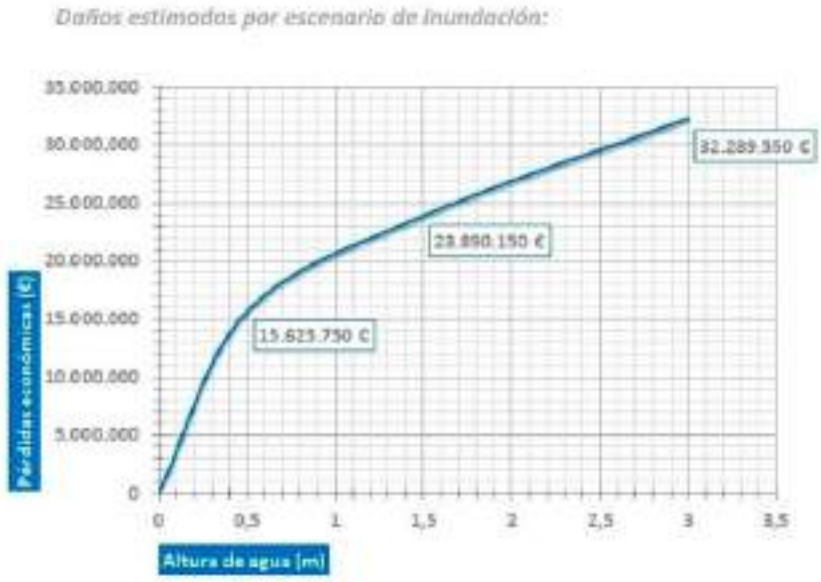


Figura 21. Caso piloto en Ampuero: daños estimados por escenario de inundación. Fuente: elaboración propia.

SITUACIÓN ACTUAL	**T=10**	**T=100**	**T=500**
Altura de agua (m)	1,2	1,7	2,2
Probabilidad anual	0,1	0,01	0,002
Daño	22.000.000 €	25.000.000 €	28.000.000 €
Daño incremental	1.100.000,00 €	2.115.000,00 €	212.000,00 €
Daño anual medio			3.427.000,00 €
Daño 30 años			102.810.000,00 €
MEDIDAS IMPLEMENTADAS: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**145.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**86,67%**
Beneficio/Coste			**614,54**
MEDIDAS IMPLEMENTADAS + COMPLEMENTARIAS: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**469.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**100,00%**
Beneficio/Coste			**219,21**

Tabla 5. Caso piloto en Ampuero: análisis beneficio/coste. Fuente: elaboración propia.

4.8. Monasterio de Santa María de Huerta (Soria)

Santa María de Huerta (267 habitantes, Soria) experimenta desde la antigüedad, y a consecuencia de precipitaciones intensas y muy localizadas, el incremento repentino del caudal de los barrancos que alimentan el río Jalón a su paso por la localidad, generando inundaciones relámpago con graves consecuencias en el núcleo urbano. Transformaciones en la cuenca hidrográfica vinculadas a la agricultura, así como la presencia de obstáculos artificiales y obras hidráulicas de capacidad insuficiente, agravan en la actualidad el problema.

El Monasterio de Santa María de Huerta, ejemplo de arquitectura cisterciense construido entre los siglos XII y XVI, declarado Bien de Interés Cultural con la categoría de monumento, es un elemento fundamental en el patrimonio cultural soriano y castellano leonés. El colapso del denominado

barranco del Tejar provocó el 23 de junio de 2015 la rotura del muro perimetral a su paso por el cementerio, si bien los daños en el monasterio fueron limitados. Un nuevo episodio el 9 de septiembre de 2018 derribó de nuevo el cerramiento, generando la irrupción violenta del agua y el arrastre de piedras y otros elementos. En el interior del edificio, el agua superó el metro de altura en la iglesia, refectorio, sala de conversos, claustros y otras estancias. Asimismo, la inundación afectó a diversos trabajos de acondicionamiento y excavación.

Tras el episodio de 2018, se estableció un paquete de actuaciones valorado en 400.000 euros, incluyendo (entre otras medidas de reparación, prevención y puesta en valor) la instalación de compuertas en el muro perimetral para evacuar el agua del interior del recinto, la construcción de un muro metálico para evitar el contacto del agua con el edificio y la mejora del drenaje.



Figura 22. Medidas de adaptación implementadas en el Monasterio de Santa María de Huerta. Fuente: Grupo Tragsa.

El caso piloto plantea estudiar la compatibilidad entre protección del patrimonio e inundabilidad, priorizando los distintos elementos. Esto es, evitar que el agua entre en contacto con el monasterio, el cementerio y los restos arqueológicos para garantizar su conservación, pero tolerar que parte del recinto se inunde de forma controlada en caso de avenida, evitando una rotura brusca del muro que incremente los daños. Al favorecer la transparencia hidráulica, el recinto actuaría como una infraestructura verde y azul, laminando el agua y proporcionando beneficios tanto al monasterio como al núcleo urbano. Se enriquecen así los valores del patrimonio cultural, al aportar nuevos servicios ambientales y al establecer sinergias entre su conservación y la adaptación a los futuros condicionantes hidrometeorológicos.

El patrimonio cultural ha de ser objeto prioritario de adaptación al riesgo de inundación dada la importancia de sus valores simbólicos e identitarios. Los análisis beneficio/coste deben por tanto completarse con nuevos indicadores cualitativos y cuantitativos, e incorporar en la valoración los beneficios indirectos derivados de las medidas de adaptación, especialmente cuando estas proporcionan nuevos valores ambientales, económicos y sociales.



Figura 23. Caso piloto en S.M. Huerta: esquema resumen. Fuente: elaboración propia.

4.9. Casa de Ganaderos de Zaragoza (Nuez de Ebro, Zaragoza)

En el marco de la *Estrategia Ebro Resilience*, se está analizando una serie de explotaciones agrícolas y ganaderas situadas en el eje medio del Ebro para conocer su grado de resiliencia frente a inundaciones e identificar las medidas de prevención, protección y preparación más eficientes. Estos casos piloto se focalizan en la protección de cultivos, animales, edificios, instalaciones e infraestructuras existentes, y en las medidas que los gestores de estas explotaciones pueden llevar a cabo, aplicando los contenidos recogidos en la guía de *Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas.*

El primer paso para decidir qué tipo de medidas se deben adoptar para adaptar las explotaciones al riesgo de inundación es conocer el estado actual de la explotación e identificar el nivel de resiliencia de la misma frente a la inundación. Para ayudar al propietario de la explotación en esta tarea, se ha diseñado una lista de chequeo, que intenta evaluar el grado de conocimiento de este riesgo y las líneas de mejora. Una vez analizada la resiliencia de la explotación en sí, es necesario contextualizar el resultado en función de la zona inundable en la que esta se encuentre. Se considera necesario que las explotaciones situadas en zona inundable de baja probabilidad de ocurrencia cuenten al menos con una póliza de seguro agrario con cobertura para daños producidos por inundación, complementada con alguna medida destinada a evitar los daños más significativos. Sin embargo, las explotaciones en zona inundable de alta probabilidad de ocurrencia deberán contar, además de con las anteriores, con una batería de medidas más amplia, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad.

La Casa de Ganaderos de Zaragoza es una cooperativa ganadera histórica ubicada en el término municipal de Nuez de Ebro, con más de 200 socios. Sus instalaciones están diseñadas para recibir, clasificar, criar y engordar entre 3000 y 5000 cabezas de ganado. Está situada junto al cauce del río Ebro, en una zona de alta probabilidad de inundaciones, al lado de la Presa de Pina y de la carretera ARA-A1. El trazado en terraplén de un tramo de esta carretera genera un dique de retención en grandes avenidas, agravando la situación y multiplicando los daños. En 2015 y 2018 se alcanzaron calados superiores a un metro, con tiempos de permanencia de varios días. A pesar de haber realizado la evacuación del ganado con antelación, se produjeron pérdidas cuantiosas por daños directos. El alquiler de instalaciones temporales hasta la recuperación de las propias supuso también costes elevados.

La principal medida propuesta es la protección de los accesos a naves y establos para evitar la entrada de lodos, facilitando la recuperación y acortando los plazos para la vuelta a la normalidad. Como

alternativas, se propone el empleo de barreras temporales en todos los accesos (alternativa 1) o el tapiado de varios de ellos y la instalación de dichas barreras solo en los restantes (alternativa 2). La segunda opción arroja la relación beneficio/coste más favorable (16:1). Adicionalmente, se propone el establecimiento de un Protocolo y Plan de Emergencia de la explotación, así como la revisión de las pólizas de seguros.

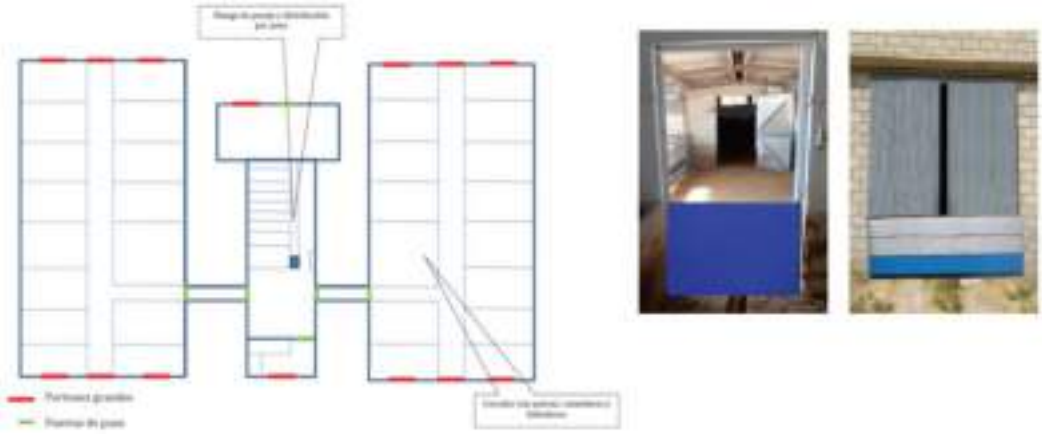


Figura 24. Caso piloto en Nuez de Ebro: esquema resumen. Detalle: barreras desmontables y apilables. Fuente: elaboración propia y CAG Canalizaciones.



Figura 25. Caso piloto en Nuez de Ebro: daños estimados por escenario de inundación. Fuente: elaboración propia.

SITUACIÓN ACTUAL	T=10	T=100	T=500
Altura de agua (m)	1,2	1,95	3
Probabilidad anual	0,1	0,01	0,002
Daño	380.000 €	600.000 €	600.000 €
Daño incremental	35.000,00 €	44.100,00 €	4.800,00 €
Daño anual medio			83.900,00 €
Daño 30 años			2.517.000,00 €
ALTERNATIVA 1: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**102.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**47,00%**
Beneficio/Coste			**11,61**
ALTERNATIVA 2: COSTE ESTIMADO TOTAL €			**74.000 €**
Reducción teórica del riesgo			**47,00%**
Beneficio/Coste			**16,00**

Tabla 6. Caso piloto en Nuez de Ebro: beneficio/coste. Fuente: elaboración propia

5. CONCLUSIONES

Los *Casos piloto de adaptación al riesgo de inundación* permiten extraer las siguientes conclusiones, que remarcan la importancia de la adaptación dentro de las políticas de gestión del riesgo de inundación:

- La adaptación al riesgo de inundación puede contribuir significativamente a disminuir las pérdidas económicas y a mejorar la seguridad de los usuarios. Estas medidas no deben entenderse de forma aislada, sino en el marco de estrategias integrales que permitan mejorar la resiliencia y afrontar los futuros condicionantes hidrometeorológicos. Como complemento a las transformaciones territoriales a largo plazo, la adaptación ofrece respuestas inmediatas frente a eventos para los que, en condiciones actuales, no existe capacidad de respuesta. En las ciudades y comunidades, la ordenación del territorio y la reducción de la exposición constituyen las principales medidas de prevención, pero la inversión en este tipo de medidas puntuales de carácter paliativo, relativamente económicas y sencillas, puede evitar daños muy elevados.

- Los análisis beneficio/coste arrojan resultados muy favorables en determinadas tipologías como los aparcamientos subterráneos, los centros de investigación y polígonos industriales. Es preciso adaptar también las infraestructuras estratégicas cuya inoperatividad puede comprometer el resto de la red urbana; las dotaciones de uso sanitario, residencial público y docente por la vulnerabilidad que plantea su uso y las características de sus ocupantes; los edificios institucionales donde se activan determinados protocolos de emergencia; o el patrimonio cultural, dada la importancia de sus valores simbólicos e identitarios. Los análisis beneficio/coste deben por tanto completarse con nuevos indicadores cualitativos y cuantitativos, e incorporar en la valoración los beneficios indirectos derivados de la adaptación, incluyendo nuevos valores ambientales, económicos y sociales.

- La divulgación es fundamental para fomentar la cultura del riesgo. Es preciso impulsar la responsabilidad compartida y el compromiso público y privado, promoviendo incentivos que estimulen la adaptación e implicando a todos los interesados en la gobernanza del riesgo.

REFERENCIAS

- CEPRI (2014). *Comment saisir les opérations de renouvellement urbain pour réduire la vulnérabilité des territoires inondables face au risque d'inondation? Principes techniques d'aménagement*.
- FEMA (2014). *Homeowner's Guide to Retrofitting. Six Ways to Protect Your Home From Flooding*. 3rd Edition.
- García García, M. (2016). Desmontando la paradoja de la sostenibilidad. *Revista Ambienta*, 116, 4-22.
- Marañón, B. (2019). Planificación y gestión del sistema hidrológico de Vitoria-Gasteiz en clave de infraestructura verde ("infraestructura azul"). *Revista de Obras Públicas*, 166, 21-26.
- Ollero, A. (2014). *Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores*. Contrato del río Matarraña.
- Perales-Momparler, S. y Valls-Benavides, G. (2013). Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS). *Revista Paisea*, 24, 68-75.

ESTUDIO DE IMPACTO DE TSUNAMIS EN LAS COSTAS ESPAÑOLAS

Miguel Llorente Isidro
Jefe de Proyectos, Instituto Geológico y Minero de España y Universidad Politécnica de Madrid, España
m.llorente@igme.es
https://orcid.org/0000-0002-8829-6533

Marta Fernández-Hernández
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España y Universidad Politécnica de Madrid, España
m.fernandez@igme.es
https://orcid.org/0000-0002-7258-117X

Alejandro González del Pino
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España y Grupo EDANYA de la Universidad de Málaga, España
alejandro.gonzalez@igme.es
https://orcid.org/0000-0002-4706-5958

Julián García-Mayordomo
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
julian.garcia@igme.es
https://orcid.org/0000-0001-9203-271X

Juan Vicente Cantavella Nadal
Instituto Geográfico Nacional, España
jvcantavella@mitma.es
https://orcid.org/0000-0003-4839-0602

Jorge Macías Sánchez
Grupo EDANYA, Universidad de Málaga, España
jmacias@uma.es
https://orcid.org/0000-0002-3010-8050

Juan-Tomás Vázquez
Instituto Español de Oceanografía. Centro Oceanográfico de Málaga, España
juantomas.vazquez@ieo.es
https://orcid.org/0000-0002-3747-4838

Carlos Sánchez Linares
Grupo EDANYA, Universidad de Málaga, España
csl@uma.es
https://orcid.org/0000-0002-3010-8050

Carlos Paredes Bartolomé
Universidad Politécnica de Madrid, España
carlos.paredes@upm.es
https://orcid.org/0000-0001-9580-2679

Ricardo León Buendía
Instituto Geológico y Minero de España, España, España
r.leon@igme.es
https://orcid.org/0000-0001-5598-0710

RESUMEN

Este artículo presenta el proyecto de *Estudio de impacto (económico) por tsunamis en España*, amparado en un convenio entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), con el apoyo activo de otros muchos organismos públicos de investigación y universidades españolas. El objetivo del proyecto es generar conocimiento útil tanto para el CCS (pérdidas esperables) como para el IGME (cartografiado de peligros naturales). No obstante, en el camino para alcanzar tal objetivo habrá muchos resultados de utilidad y provecho que redundarán en una sociedad más segura y mejor informada. El estudio se desarrolla en tres fases secuencialmente: identificación y caracterización de fuentes tsunamigénicas; simulación de tsunamis (propagación e inundación; peligrosidad); y análisis de daños directos previsibles (exposición, vulnerabilidad y riesgo). Para la primera fase, se construirá el catálogo de proyecto de fuentes tsnuamigénicas en la zona de estudio, a partir de las bases de datos de fallas activas del IGME (QAFI), el catálogo sísmico y de tsunamis del Instituto Geográfico Nacional (IGN), y otras fuentes de información sobre geología marina. La segunda fase resolverá, para las fuentes anteriores, el modelo Tsunami-HySEA, desarrollado por el grupo de investigación EDANYA de la Universidad de Málaga, mediante supercomputación. La tercera fase se apoyará en bases de datos catastrales, en las bases de datos del Consorcio de Compensación de Seguros y en otras fuentes de información relevante procedentes de distintos catálogos, que permitan aproximar la valoración de los bienes en las áreas inundadas y su función de vulnerabilidad. Por último, mediante técnicas de análisis con Sistemas de Información Geográfica, se derivará el cálculo del riesgo, integrando los factores peligrosidad, exposición, y vulnerabilidad.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el ámbito de los desastres naturales, ya es un clásico citar a la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de EEUU (FEMA, 2007), para hacer referencia a las ventajas de invertir *sensu lato* en prevención de desastres (desde una perspectiva económica). Otros muchos autores han ahondado en aquel estudio de coste beneficio (MHMC, 2019), aportando nuevas cifras. La ratio promedio de beneficio es de 1 a 4 para inundaciones fluviales o de 1 a 7 para huracanes. Es decir, por cada euro (o dólar) invertido en prevenir desastres naturales, se recuperan entre 4 y 7 euros (o dólares) por daños evitados. Prevenir desastres es un negocio de muy alta rentabilidad económica; además, también es una obligación legal en algunos casos, y en todos es una obligación moral y ética para las administraciones hacia sus administrados y sus arcas.

“Prevenir desastres” es una idea que engloba muchos campos de actuación. Siguiendo la nomenclatura estandarizada con las especificaciones de datos de INSPIRE sobre Zonas de Riesgo

Natural[1] (Directiva Europea 2007/2/EC[2]), la prevención puede considerarse como cualquier actuación encaminada a la reducción del riesgo. Es decir, prevenir puede ser una acción dirigida a la reducción de cualquiera o de varios de los elementos integrantes del riesgo, que son la peligrosidad (P), la exposición (E) y la vulnerabilidad (V). Las herramientas de prevención, se pueden clasificar como anti-P, anti-E o anti-V, o cualquier combinación entre ellas, hasta anti-Riesgo (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002). Los seguros se pueden entender como medidas anti-exposición, en cuanto este parámetro es el único de los tres que se expresa (o puede expresarse) en términos monetarios. Pero lo cierto es que son medidas enfocadas *a priori* a un nivel paliativo (anti-R; o *ex post*), que se dimensionan *ex ante*. Es decir, entran en funcionamiento sin intervenir necesariamente en el proceso de construcción del riesgo (P, E, V) o con una intervención materializada mediante la prima que formaliza la transferencia del riesgo, o mediante la comunicación del mismo (Marchal et al. 2019, Rodgers, 1991). Cuando se instrumentaliza el seguro como herramienta disuasoria, como se hace, por ejemplo, en el caso de EEUU, su intervención sobre la exposición es evidente. Sin embargo, esto no siempre es todo lo eficaz que se quisiera, como se pone de manifiesto en el caso alemán, con una penetración en el mercado de apenas el 30% (Krieger y Demeritt, 2015). Las herramientas paliativas, en el caso que nos ocupa, requieren un diseño adecuado. Gracias a la Directiva SOLVENCIA II (Directiva 2009/138/CE[3]) se regula la actividad de seguro y reaseguro y su ejercicio, y se reglamenta entre otras cosas parte de la gestión del riesgo, al objeto de garantizar el mecanismo asegurador: el pago (y el cobro) de la indemnización. Para poder satisfacer esta directiva, es imperativo disponer de conocimiento que permita comprender la siniestralidad. Este primer y fundamental paso, constituye en sí mismo una poderosa herramienta preventiva, pues su adecuada difusión incentiva la puesta en marcha de medidas de mitigación, tanto las de autoprotección, como las demandas sociales y colectivas para implantar otras acciones de ámbito superior (colectivo, estatal o supraestal). En el fondo, dada la naturaleza no lucrativa de la actividad indemnizatoria, la intención del asegurado está alineada con la del asegurador: prevenir el daño. Cabe, como es lógico, la excepción que conforma el fraude al seguro[4]. Este alineamiento ha despertado iniciativas para promover inversiones del sector seguro en medidas preventivas tipo "Soluciones Basadas en la Naturaleza" (o NBS por sus siglas en inglés) debido al enfoque holístico de esta aproximación (Marchal et al. 2019). Por otro lado, dado que la construcción del riesgo reside no sólo en los elementos afectados en primera instancia, sino que puede tener consecuencias en el sentido comunitario y topológico de las relaciones entre las partes, el seguro es un mecanismo constructor de resiliencia, pues facilita la recuperación de los afectos conteniendo el impacto generalizado o reacciones en cadena. Ello está en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para la Agenda 2030[5], encaminado con el objetivo 11 de sostenibilidad de comunidades y ciudades, pero al mismo tiempo reforzando el papel de otros actores como elementos reductores del riesgo (como la acción por el clima, objetivo 13; la vida submarina, objetivo 14; y los ecosistemas, objetivo 15; por citar algunos).

El CCS es la entidad española que, desde 1954, es responsable de satisfacer las indemnizaciones por determinados tipos de desastres naturales, o en terminología del propio CCS, *da cobertura a riesgos extraordinarios* (que incluyen, entre otros, *fenómenos de la naturaleza*). Algunos de estos fenómenos son los tsunamis (o maremotos), los terremotos o los volcanes, por lo que el CCS lleva trabajando conjuntamente con el IGME más de tres décadas, profundizando en el conocimiento de este tipo de eventos y la siniestralidad asociada a ellos. En esta ocasión, se aborda la cuestión de los tsunamis afectando a las costas españolas en forma de Convenio de Colaboración, dando lugar a un proyecto

[1] https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/nz
[2] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32007L0002
[3] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32009L0138
[4] En el caso del huracán Katrina de 2005, según distintos medios de comunicación, el fraude al seguro se contabilizaba por miles, y aún hoy existen causas pendientes ante los tribunales.
[5] https://sdgs.un.org/

que encuentra multitud de sinergias con otras iniciativas y entidades públicas de la Administración Española.

Una cuestión que aflora con cierta frecuencia en relación al estudio de la siniestralidad, es el uso de las bases de datos propias de los organismos aseguradores (de reclamaciones e indemnizaciones) que, en el caso de España, para tsunamis es el CCS. Dada la baja recurrencia de este tipo de eventos, esta aproximación no es posible. En concreto, para el caso de los tsunamis, tan sólo existe un registro con indemnizaciones pagadas, que se corresponde con el evento de tsunami del año 2003 (desencadenado por un terremoto en el norte de Argelia y que afectó sobre todo a las Islas Baleares). Dicho evento alcanzó un monto total de indemnizaciones de unos 350.000 euros (Espejo Gil, 2017). Esto hace que, el desarrollo de un estudio lo más completo posible sobre el impacto de los tsunamis en el seguro español, requiera un trabajo de simulación intensivo y *ad hoc*, que permita estimar las pérdidas en las zonas afectadas, lo que se persigue hacer en este proyecto, usando para ello las mejores herramientas y datos actualmente disponibles.

1.1. Los tsunamis en España

El IGN ha realizado un trabajo de recopilación, revisión y evaluación de eventos de tsunamis del pasado que han afectado a las costas españolas (Cantavella et al., 2019). En esta recopilación, se han identificado 14 eventos desde 1522 de los cuales existen pruebas con un grado de fiabilidad aceptable de su ocurrencia. Doce de estos 14 eventos han sido provocados por terremotos con epicentro localizado en el mar o cerca de la costa. Tan sólo uno de los 14 ha sido como consecuencia de una erupción volcánica (en Tenerife) y existe otro registro cuyo origen es aún desconocido.

No se debe pasar por alto que existen diversos desencadenantes posibles del fenómeno de los tsunamis. No obstante, la causa sísmica es uno de los detonantes mejor conocidos y descritos, dentro de la incertidumbre ligada a este tipo de eventos (Llorente y Macías, 2018). Por este motivo el proyecto de estudio de impacto de tsunamis en España considera como factor detonante el fenómeno sísmico, limitado al efecto de la deformación (instantánea) del fondo oceánico. Es decir, sin considerar efectos cosísmicos como, por ejemplo, deslizamientos submarinos o costeros.

Con carácter general, se puede decir que la probabilidad de que un tsunami afecte de manera significativa a las costas españoles está sujeta a una gran incertidumbre, pero se considera que esta probabilidad es baja atendiendo a los registros del pasado y a la recurrencia y tipología sísmica del entorno peninsular. No obstante, el IOC-UNESCO (2017) cifra como *casi seguro* o altamente probable, la ocurrencia de un evento significativo en una ventana de observación promedio de unos 30 años para el conjunto mediterráneo. De hecho, en los últimos 70 años, han ocurrido 3 tsunamis en el Mediterráneo occidental de tamaño pequeño o moderado, pero claramente registrados, que han afectado a las costas españolas (años 1954, 1980 y 2003).

El tsunami más significativo que afectó a las costas españolas, es el evento de 1755, que causó más de 1.200 víctimas directas reconocidas en las provincias de Huelva y Cádiz, además de otras muchas en Portugal y Marruecos (IGN, 2001). Una estimación relacionando esta cifra con el crecimiento poblacional costero desde entonces hasta hoy en día, permite tener como marco de referencia unas 20.000 personas que podrían verse afectadas en la actualidad de repetirse dicho evento. Para mejorar esta primera aproximación es necesario considerar la distribución demográfica en la costa y las zonas de afección tras la llegada del tsunami.

1.2. Objetivos y alcance del proyecto

Estudiar los posibles impactos de eventos naturales, es un anhelo de muchas sociedades, por no decir de todas. En Europa se han realizado importantes avances desde la promulgación de la Directiva

Europea de Inundaciones (Directiva 2007/60[6]). Gracias a ella la peligrosidad por inundaciones fluviales más significativas está cartografiada para todo el territorio europeo (en términos de extensión, calado, velocidad o combinación de velocidad y calado), así como el riesgo de inundaciones fluviales (en términos monetarios, totalizados o sectorizados, y en términos de elementos unitarios, como, por ejemplo, vidas o elementos patrimoniales; históricos o artísticos). Otros peligros naturales deberían seguir esta estela de éxito, que extiende su campo de acción más allá de los visores cartográficos del peligro y del riesgo, añadiendo, por ejemplo, la clasificación correspondiente en las notas simples registrales. De este modo, la información es más fácil que llegue hasta el ciudadano, para ayudarle a tomar decisiones informadas. La Directiva INSPIRE[7], es uno de los motores que impulsan a los Estados Miembro en esta dirección, al abrir en el apartado de cartografías temáticas un espacio dedicado a Zonas de Riesgos Naturales.

Estas y otras iniciativas (UNDRR, Preventionweb) convergen en un objetivo común: desarrollar conocimiento y herramientas de prevención (o reducción) de desastres (o del riesgo de desastres). Lo cual encuentra sinergias entre distintos actores de las Administraciones Públicas. Este proyecto tiene por objetivo abordar las distintas necesidades de las diferentes directivas y compromisos estatutarios de los intervinientes, así como aprovechar la ocasión para fortalecer las colaboraciones entre distintas Administraciones o Entidades Públicas españolas al objeto de maximizar el impacto de la prevención que generará el proyecto. El proyecto ya está generando una extensa red de trabajo que supera el ámbito nacional (como puso de manifiesto el taller sobre tsunamis celebrado en Málaga en 2017). Permitirá difundir la información relativa a los tsunamis y a los datos que se requieren para su estudio y ayudará en la comprensión de la dimensión de un evento de tsunami de origen sísmico. En concreto, el objetivo final de este proyecto es estimar el coste económico para el seguro que tendría en España un tsunami en cualquiera de sus costas. No se trata de un estudio de pronóstico, o predictivo, sino de dimensionamiento eficaz de los recursos necesarios para afrontar una eventualidad de esta naturaleza en consonancia con los requerimientos legales de garantía de solvencia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar el objetivo de este proyecto, es necesario desarrollar un modelo capaz de integrar las variables que intervienen: la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. La determinación de la peligrosidad es la piedra angular del proyecto, pues resulta determinante para la identificación de la exposición, y para la construcción de las funciones de vulnerabilidad.

La peligrosidad, comprendida como una magnitud o intensidad asociada a una probabilidad de ocurrencia espacial y temporal, requiere de una importante carga de simulación, que sea capaz de estimar las variables requeridas de forma distribuida en el espacio para determinadas probabilidades de ocurrencia. Hay distintas formas de abordar el estudio de la peligrosidad. Se puede buscar el evento máximo probable; el evento que saturaría el sistema asegurador; se pueden elaborar modelos probabilistas o modelos deterministas, ya sea con escenarios diseñados por expertos o reproduciendo eventos del pasado. Trabajar con “eventos máximos probables” es algo en exceso incierto, pues se discute sobre el límite físico del sistema, que puede estar muy alejado de ser práctico. Las aproximaciones de saturación tampoco resultan muy prácticas de cara a la gestión, ya que, al trabajar con magnitudes o intensidades muy elevadas, la probabilidad de estos eventos, además de ser muy baja, son también las que maximizan la incertidumbre. No obstante, son interesantes como ejercicio teórico. Un estudio probabilista tiene la ventaja de que es capaz de generar un conocimiento profundo del fenómeno, pero no siempre es práctico de cara a la estimación del impacto sobre el sector seguros, pues sus resultados no se pueden interpretar sin un intenso postprocesado, dando lugar a un número

[6] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32007L0060
[7] Directiva Europea 2007/2/EC

muy elevado de cálculos, de los cuales, sólo un número muy limitado sería significativo. Las aproximaciones pseudo-deterministas combinan lo bueno y lo malo de ambos mundos: maximizan la explotación de la información actualmente disponible, limitando el número de resultados a postprocesar e interpretar.

En todo caso, la determinación de la peligrosidad requiere de dos ingredientes básicos: el conocimiento de las fuentes tsunamigénicas (de las que ha de derivarse una aproximación a la probabilidad de excedencia) y la geometría del dominio de cálculo. Los modelos numéricos, utilizan esta información para proporcionar las variables de peligrosidad deseadas: extensiones inundables, calados máximos esperados, velocidades máximas, o flujos máximos; además de otra información importante como tiempos de llegada o altura de ola cerca de la costa.

2.1. Fuentes tsunamigénicas

Existen muchas formas de aproximarse al concepto de peligrosidad. Desde las aproximaciones conocidas en el ámbito anglosajón como "escenario zombie" o "máximo evento probable", cuya definición es incierta y su utilidad discutible, hasta la reconstrucción de eventos que ya ocurrieron en el pasado, pasando por modelos probabilistas, o aproximaciones mixtas. La idea de los "escenarios máximos probables" reside en buscar el límite superior de la función de peligrosidad, suponiendo que es asintótica, sin embargo, a efectos de impacto, es más interesante conocer la función riesgo, que contempla los parámetros exposición y vulnerabilidad. La discusión sobre su utilidad reside en la imprecisión del límite superior, que puede ser tan alto como improbable. Las aproximaciones que reproducen o reconstruyen eventos del pasado encuentran justificación en la promulgación de un axioma: "si ocurrió en el pasado, por qué no ha de ocurrir en el futuro". Las críticas a esta forma de aproximarse a los eventos es que ignoran cuestiones relativas a la probabilidad de su ocurrencia y a la no-ciclicidad de muchos procesos naturales. Las aproximaciones probabilistas puras, tienen la ventaja de que aprovechan al máximo la información de eventos disponible para realizar una descripción más completa del conocimiento de un fenómeno, lo que incluye una aproximación a la incertidumbre. Como inconveniente plantean la generación de catálogos de datos muy extensos y por tanto difíciles de explotar e interpretar. Un punto intermedio son los modelos que combinan fuentes de datos de distinta naturaleza, incluyendo eventos, evidencias físicas, indicios y otras interpretaciones de ciencias de distintos campos. Es en esta línea donde las bases de datos de fallas activas (en concreto la QAFI[8] (IGME, 2015) adquiere especial singularidad, pues permite limitar el número de fuentes tsunamigénicas a un conjunto de elementos geológicos identificados por medio de observaciones directas o indirectas. No obstante, también se consideran otras fuentes de datos para la definición de las fuentes tsunamigénicas, como la zonificación sísmica ZESIS[9] y el catálogo de terremotos del IGN (figura 1).

[8] QAFI: Quaternary Active Faults of Iberia es una base de datos de fallas con actividad en el periodo Cuaternario (últimos 2,6 ma). QAFI es de acceso público y está creada y mantenida por el IGME a partir de los trabajos de investigación que se publican periódicamente por la comunidad investigadora internacional. La QAFI está siendo actualizada gracias al impulso de este proyecto.

[9] ZESIS es una base de datos de zonas sismogénicas de la Península Ibérica y territorios de influencia desarrollada para el cálculo de la actualización del mapa de peligrosidad sísmica de España (IGN, 2017). Es el resultado de la evolución de tres modelos sucesivos en los que han colaborado numerosos investigadores tanto de centros de investigación nacionales como internacionales, y de la sinergia de muchos proyectos.



Figura 1. Captura de pantalla de la BBDD ZESIS (http://info.igme.es/zesis/) que integra la BBDD QAFI del IGME (http://info.igme.es/qafi/) y el catálogo de terremotos del IGN (https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos).

A iniciativa del IGME y de la UMA, se celebró en Málaga en 2017 un congreso internacional para discutir públicamente cuáles serían las zonas tsunamigénicas para trabajar en el proyecto, concluyendo que serían principalmente tres: la zona del Golfo de Cádiz, el Mar de Alborán y el Norte de Argelia. Se están revisando unas diez estructuras en cada una de estas zonas, que servirán como punto de partida o soporte para concentrar en ellas los parámetros sísmicos, las incertidumbres y las probabilidades asociadas.

Es pertinente señalar que para este proyecto se han descartado *a priori* las fuentes lejanas (Caribe, Mar del Norte, dorsal Atlántica), por considerar que su probabilidad de ocurrencia e impacto podrían no ser comparables a las tres zonas antes mencionadas; así como fuentes del entorno del archipiélago canario por las características propias de la actividad sísmica allí.

2.2. Topo/Batimetrías

El modelo numérico topo-batimétrico representa la geometría del dominio de cálculo. La conceptualización de dicha geometría, a los efectos de su integración en el modelo Tsunami-HySEA (Macías et al. 2016), parte de la idea de que la influencia de la geometría en el cálculo es inversamente proporcional a la profundidad que representa. Es decir, a mayores profundidades, la influencia sobre la propagación del tsunami es menor, mientras que a menores profundidades (en la proximidad a costa), así como en las zonas emergidas, la influencia en el cálculo es mayor. Así, se deriva que el requerimiento en el grado de detalle o resolución de la geometría sea, como "regla del pulgar" (aprox) del orden de magnitud de la profundidad representada. En el campo de los modelos de simulación, este tipo de inhomogeneidades en la definición de la geometría se resuelve por uno de dos métodos: mediante mallas no estructuradas o mediante mallas estructuradas anidadas. El modelo Tsunami-HySEA trabaja con esta segunda vía (Macías et al., 2016), donde las mallas de menor resolución, de ser posible, se obtienen por generalización de mallas de mayor detalle, lo que garantiza la compatibilidad entre las mallas anidadas (figura 2). Allí donde no existan mallas de la resolución requerida, se usan técnicas de interpolación para densificar o incrementar la resolución, partiendo de datos de menor resolución. Mientras que las técnicas de generalización permiten un gran control sobre el nivel de filtrado de elementos, las técnicas de interpolación no dejan de ser un mal necesario para conseguir una transición apropiada hacia costa. Además, es necesario un trabajo de preprocesado de datos en las fronteras o solapes entre catálogos para minimizar las discrepancias existentes. En este

proyecto, se prevé la realización de algunos ensayos para hacer una estimación aproximada del nivel de incertidumbre que genera el efecto de interpolado, y que se anticipa que será determinante.

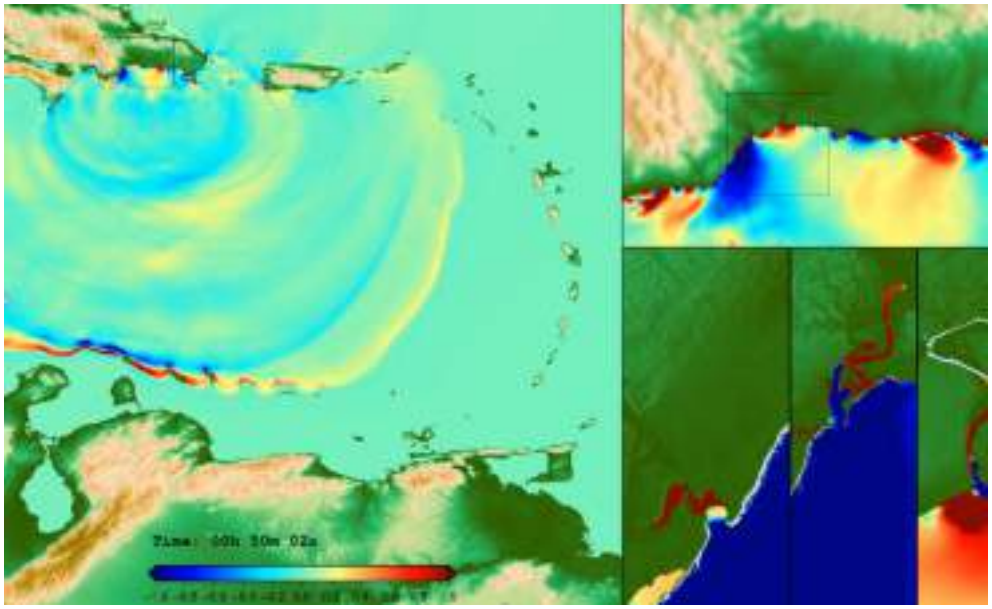


Figura 2. Diferentes dominios de cálculo utilizados para la simulación de escenarios de tsunami (modificado de Macías et al. 2017b). Cada dominio tiene un nivel de resolución diferente, en mallas anidadas.

Los avances que se han realizado en los últimos años en relación a la obtención de datos de elevaciones del terreno emergido han sido muy notables. La transición desde los modelos de restitución fotogramétrica lacia los modelos generados mediante nubes de puntos obtenidas por láser aerotransportado (LIDAR), ha supuesto un cambio de paradigma. Hace tan sólo unos pocos años, era casi impensable contar con una cobertura generalizada de alta resolución y con alto grado de homogeneidad y calidad. Sin embargo, a día de hoy, el IGN publica en la web del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) toda la nube de puntos LIDAR y datos procesados. En concreto, ya está disponible todo el territorio nacional con una cobertura de 5 metros de pixel y gran parte del territorio está también disponible a 2 metros de pixel. Esta fuente de información topográfica permite hoy abordar una gran variedad de proyectos y es en particular una fuente de información esencial en el campo de los tsunamis. Nunca antes había existido una cantidad y calidad de datos tan singular, y su aprovechamiento es una oportunidad y una necesidad que repercutirá en más beneficios sobre la sociedad de los que podrían mencionarse en esta breve reseña. Al mismo tiempo, esta gran cantidad de datos plantea retos en su explotación en el campo costero. Las dificultades en la definición de la "línea de costa", o las incertidumbres por distintos motivos, hacen que trabajar con estos datos requiera una alta especialización. En cuanto al volumen de datos, la malla española de 5 metros de pixel ocupa unos 250 GB en formato matricial de ESRI, por lo que cualquier análisis requiere también de un potente soporte computacional.

Por su parte, en el ámbito marino también se están produciendo cambios importantes, pero las dificultades que entraña el trabajo en las masas de agua, añadido a otras cuestiones (limitaciones presupuestarias y de recursos en general), no han permitido aún un nivel similar de cobertura global (o generalizada), y los catálogos de datos existentes no siempre son accesibles, pues se han obtenido para distintas campañas y proyectos de investigación. No hay una iniciativa de cartografía sistemática del medio marino equiparable a la que se ha realizado sobre terreno emergido, debido a estas dificultades, a las que se suma el reto de conseguir que los catálogos resulten compatibles u

homogéneos. La inhomogeneidad de los catálogos (figura 3) responde a cuestiones relativas a las referencias fundamentales de partida, vinculadas a los objetivos de la toma de datos de cada campaña, el uso de distintos métodos y mecanismos de adquisición. La mayor parte de los datos batimétricos provienen del buque de investigación oceanográfico Hespérides, mediante ecosonda multihaz de aguas profundas. Esta forma de obtener batimetrías recopila datos cuya densidad areal depende de la profundidad, es decir, a mayor profundidad, menor resolución, pues el ángulo de los haces se mantiene constante. Sin embargo, dadas las características de la embarcación, la mayoría de estos datos son de aguas profundas.

Para las zonas de aguas someras se requieren embarcaciones más pequeñas. Además, dado que se requiere de un cierto solape de datos, la derrota de la embarcación permite líneas más distantes en aguas más profundas que en aguas someras, lo que deriva en la necesidad de realizar recorridos muy largos en zonas someras.

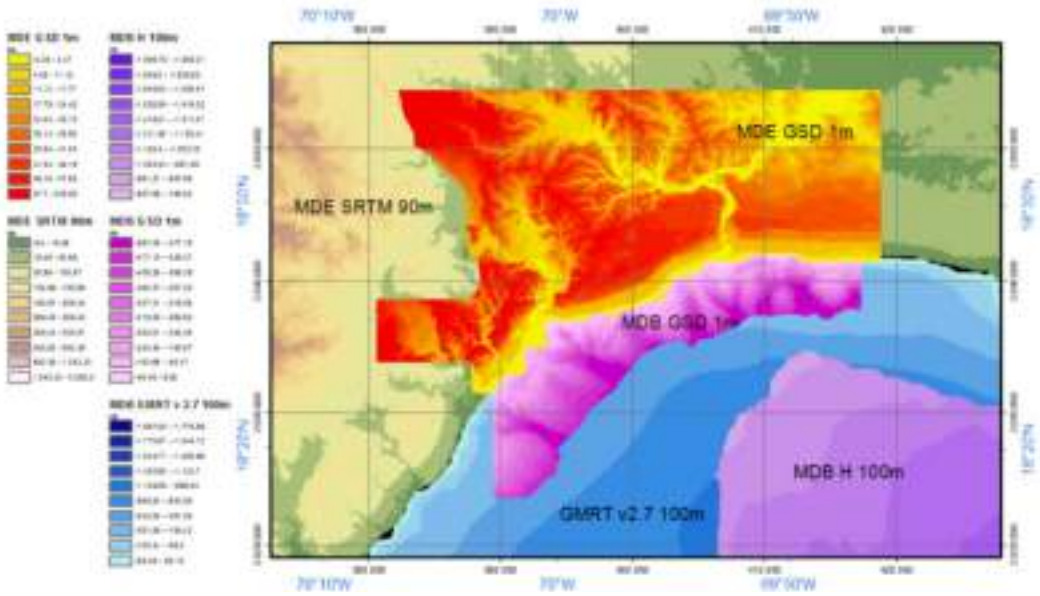


Figura 3. Ejemplo de cobertura de catálogos de datos batimétricos de distintas fuentes para la construcción del modelo topobatimétrico de mallas anidadas. Fuente: Llorente, 2016.

Por todo ello, existen en las Administraciones Públicas Españolas una amalgama de catálogos de datos, muchos de ellos dispersos e inconexos. Para resolver esta situación, existen iniciativas nacionales e internacionales de unificación, cuyo grado de éxito es muy notable, pero aún es necesario invertir más esfuerzos para conseguir la información batimétrica que sería deseable para proyectos como el que se presenta en este artículo.

En octubre de 2019, el IGME y el CCS presentaron públicamente el proyecto sobre el Estudio de Impacto de Tsunamis en España, mostrando un esquema de los datos que se podrían usar para el proyecto, conscientes de que podrían ser útiles para otras muchas iniciativas, entre ellas, el Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis del IGN. El IGME y el IGN, ante la perspectiva de encontrar en este proyecto sinergias útiles para cumplir los propósitos de cada parte, han comenzado a intercambiar catálogos de datos para la construcción de un modelo topo-batimétrico común, que sirva de referencia para los trabajos sobre tsunamis. A esta iniciativa se ha sumado el Instituto Español de Oceanografía y se espera que otras Administraciones y entidades puedan contribuir también aportando con sus respectivos catálogos.

A día de hoy, el IGME y el IGN ya han intercambiado las fuentes batimétricas con permisos explícitos para ello por parte de los autores de los catálogos. Así, se cuenta con datos batimétricos procesados de diferentes campañas oceanográficas en el marco del proyecto europeo EMODnet Bathymetry, High Resolution Seabed Mapping (con resolución 0,001 grados, equivalente a unos 115 metros), y de las campañas de ecocartobatimetrías del litoral peninsular de la Subdirección General para la Protección de la Costa del Ministerio para la Transición Ecológica (a resolución 5 metros por pixel).

2.3. Exposición

Dado que el objetivo del proyecto es la estimación del impacto desde una perspectiva monetaria, hay que realizar un ejercicio de abstracción para obtener un indicador monetario de referencia que sirva como elemento de partida. En otros trabajos se han hecho aproximaciones *ad hoc* para asignar valores monetarios a distintos elementos del territorio, subdividido conforme a distintos criterios. El Sistema de Información y Ocupación del Suelo (SIOSE, www.siose.es), ha sido en los últimos tiempos un referente en este sentido, gracias a la exhaustiva información que proporciona. No obstante, en trabajos previos (Llorente, 2015) se ha podido comprobar que la estimación monetaria de los elementos del territorio puede encontrar menos sesgos de interpretación si se acude a fuentes con objetivos de naturaleza tributaria, como es el caso del catastro y la valoración catastral. El catastro es la base de datos más completa, y más actualizada de bienes inmuebles, pues conforma una de las bases de tributación de los ciudadanos. La valoración catastral es un concepto real desde el punto de vista de la tributación, pero meramente aproximado desde el punto de vista del mercado de la compra-venta. Una de las grandes ventajas de la base de datos catastral es que distingue en la propiedad inmueble dos elementos muy diferenciados y relevantes a efectos de estimación de daños. Por un lado, considera valores de suelo y por otro lado valores de vuelo. Mientras que el suelo se puede considerar un valor seguro, en el sentido de no susceptible de daño, el valor del vuelo (la construcción) es el objeto de interés de cara al seguro. A fin de cuentas, en la intervención de la indemnización, se persigue reponer el objeto dañado, cuya ubicación física sobre una parcela, en principio, no se espera que desaparezca. Aun existiendo una desaparición del suelo (deslizamientos, subsidencias, etc), se podría considerar este aspecto como una cuestión secundaria para plazos de estudio en el orden de uno o dos lustros. De cara a plazos más extensos (a cien años vista o más), este efecto podría tener alguna consecuencia más allá de una anécdota, lo cual podría ser interesante si se incluyen los efectos del cambio global, que incluyen la previsión del ascenso medio del nivel del mar, variaciones en la línea de costa por efectos geológicos naturales (subsidencias, variaciones eustáticas) así como otras influencias antrópicas (no llegada de sedimentos de los cursos fluviales por su intercepción en embalses, desarrollos que incrementen o disminuyan la erosionabilidad de costas, planificación ordenada o no del territorio).

El único inconveniente que plantea usar la base de datos catastral es que, para acceder a los datos de valoración de vuelo (y suelo), es requisito ser usuario con privilegios y someterse a una estricta confidencialidad, puesto que se accede a datos protegidos por la legislación. Para poder cumplir con todas las garantías legales, y abordar el trabajo, uno de los primeros y más fundamentales pasos que dará el proyecto, es la anonimización absoluta de dicha base datos. Para la anonimización completa de la base de datos, se utilizan técnicas de generalización en distintos pasos del proyecto que no son reversibles, como, por ejemplo, la estimación de la densidad de valor por unidad de tesela y altura en grupos de parcelas catastrales por códigos postales.

Para la evaluación de los bienes muebles, se adoptarán dos considerandos. De una parte, el seguro de vida se contempla también como una densidad monetaria, y la distribución de habitantes y vehículos (por tipo de vehículo) se realiza conforme a los usos y valores de las parcelas catastrales.

Las incertidumbres que se plantean en todo análisis de riesgos no son despreciables. Un cambio en la hora de ocurrencia de un evento es suficiente para que el resultado sea disímil en extremo, lo cual es

notorio en el caso del análisis del impacto en términos monetarios de los bienes muebles y, por encima de ello, del impacto en la estimación de pérdidas aseguradas en vida. Esto sin contar las incertidumbres procedentes del resto de variables que intervienen. Sin embargo, la incertidumbre no es impedimento para realizar una estimación cuya pretensión en ningún caso es aproximarse a ningún evento real (o futuro), sino servir de instrumento de gestión.

2.4. Vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad refleja el grado daño esperable (de 0, nada; a 1, todo) a un elemento, como consecuencia de un determinado impacto (físico, químico). La vulnerabilidad es por lo tanto una función dependiente de la magnitud o intensidad del evento distribuido por el territorio, dependiente de las propiedades intrínsecas de los objetos y de los procesos a los que se podrían someter. A raíz del evento de Sumatra de 2004, surgieron numerosos trabajos que aproximaban la idea de vulnerabilidad por tsunami (Post et al. 2007; Teh et al. 2011). No obstante, y a pesar de los esfuerzos exitosos de validación de los mismos, es cuestionable que los modelos que han servido para aquellos casos sean también apropiados para el proyecto que nos ocupa. Ello es debido a que no son comparables los elementos analizados en aquellas costas con el caso español, tanto por el tipo constructivo, como por la topología social y cultural que influyen en la distribución territorial de los objetos analizables (Papathoma et al. 2003; Leone et al. 2011). En este trabajo se analizará la vulnerabilidad siguiendo el modelo de Llorente (2015), normalizando funciones de daño obtenidas para inundaciones fluviales. Tiene la ventaja de que los elementos analizados son propios del territorio nacional, y tiene el inconveniente que, desde la perspectiva del tsunami, quedaría analizado el proceso como un elemento unitario, y no como una sucesión de eventos de inundación. A lo largo del proyecto, se estudiarán otras formas de aproximar la función de vulnerabilidad que puedan tener un mejor ajuste y siempre que sea factible (como, por ejemplo, las curvas de daño desarrolladas por Martínez-Gomariz et al, 2019, 2020; figura 4).

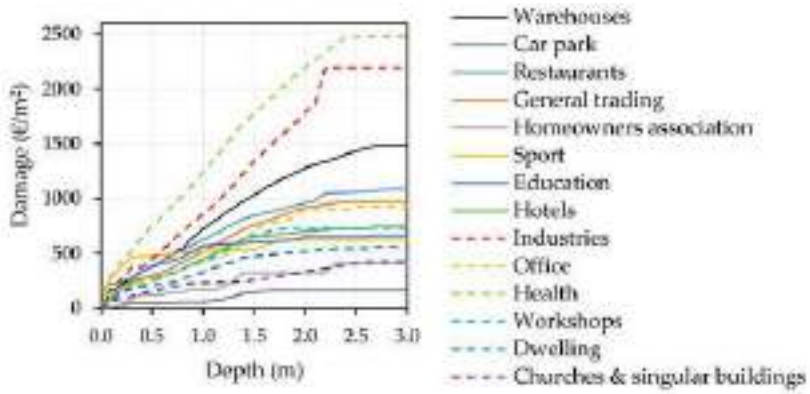


Figura 4. Ejemplo de curvas de daño. Fuente: Martínez-Gomariz, 2020.

2.5. Peligrosidad

La peligrosidad de un fenómeno se puede entender como una función o un conjunto de funciones que relacionan las magnitudes o intensidades (o derivados) con la probabilidad de ocurrencia, distribuidas en el espacio. Es decir, para cada unidad espacial (o pixel), se pueden determinar un conjunto de funciones. Esta aproximación puede dar lugar a catálogos extensos de datos, lo que resulta en que la interpretación no sea sencilla. Por ello es frecuente tomar como referencia una probabilidad determinada y representar en distintos conjuntos cartográficos una o varias variables para esa tasa de excedencia. En el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI[10]), se utilizan los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años. Se trata de las probabilidades de que el valor

[10] https://sig.mapama.gob.es/snczi/

representado sea igualado o excedido durante un año en un 10%, 2%, 1% y 0,2%, y la variable a representar suele ser la extensión de la zona inundable, su calado máximo (o profundidad máxima de agua en un punto durante toda la simulación, h), la velocidad máxima (u) o el flujo máximo instantáneo (h*u). Otras representaciones pueden incluir intervalos que sea útiles desde la perspectiva del daño, identificando valores considerados "umbral" o representativos de alguna cuestión relacionada con un incremento significativo en la probabilidad de daño (como el límite de flotabilidad de un vehículo o de una persona). Otras magnitudes menos frecuentes en su representación, pero no por ello menos interesantes, son los tiempos de llegada del fenómeno de la inundabilidad, u otras medidas de tiempo ligadas al fenómeno. Para el caso de las inundaciones fluviales, esto serían tiempos de concentración, tiempo base del hidrograma, volúmenes totales, tiempo al pico, etc.

En el caso de los tsunamis, desde el punto de vista de la estimación del riesgo, los principales parámetros de interés son muy similares a los de las inundaciones fluviales: extensión, calados, velocidades y flujo máximo instantáneo. Pero al contrario que sucede en el caso de las inundaciones fluviales, aquí es más frecuente encontrar representaciones ligadas a los tiempos del fenómeno descrito como una altura de ola en proximidad a la costa; algo difícil de explotar desde el punto de vista del cálculo de riesgos. No obstante, esta aproximación es muy interesante para evaluar si cabe la puesta en marcha de sistemas de alerta temprana u otras medidas que permitan o faciliten la evacuación de personas. Es menos frecuente, en el caso de los tsunamis, la representación de extensiones, calados, velocidades y flujos máximos porque la dinámica del flujo es compleja y el esfuerzo necesario para su aproximación es mayor que para el caso de las inundaciones fluviales. Con frecuencia, los estudios de peligrosidad por tsunamis se centran en tiempos de llegada de la primera ola y la altura máxima de ola cercana a la costa. Con la tecnología desarrollada por el equipo EDANYA de la UMA[11], los tiempos de cálculo se han acortado desde los días a los segundos, por lo que, con datos suficientes, la estimación de estos parámetros con esta tecnología es muy eficiente (Macías et al. 2020a, b). Sin embargo, los requerimientos para desarrollar un estudio de inundabilidad por tsunamis, con flujos altamente turbulentos, sometidos a divergencias y convergencias de flujos, y fenómenos de amplificación locales, hace que los cómputos resulten costosos. Existen modelos que abordan esta cuestión mediante aproximaciones unidimensionales, lo que resulta práctico cuando se trata de hacer estimaciones preliminares. Sin embargo, estos modelos no tienen en consideración la naturaleza intrincada y tortuosa de las trayectorias del flujo.

Para abordar la estimación mediante CFDs de la inundabilidad de los tsunamis, se sigue un proceso secuenciado. Primero se genera la condición inicial de perturbación del fondo marino, que afecta de manera instantánea a la lámina de agua sobre el área de la deformación (figura 5). Después se calcula la propagación de esa perturbación como un fenómeno oscilatorio de gran longitud de onda (figura 6). Y finalmente, mediante un anidamiento de mallas estructuradas, se simula la inundación costera (figura 7).

En la primera parte del proceso, conocidos los parámetros de la fuente tsunamigénica, se simula una deformación cortical instantánea. Esta deformación se suele aproximar como un plano o un conjunto de planos de rotura que afectan a la litosfera siguiendo un modelo elástico y descrito clásicamente mediante las ecuaciones de Okada (1985). La ventaja de este método reside en su amplia aceptación en la comunidad internacional, su relativa simplicidad en el uso e integración de resultados como condiciones iniciales. Durante este proyecto se evaluarán otras aproximaciones a la rotura sísmica y la influencia de este tipo de mecanismos en la generación de tsunamis. Además, para cada fuente tsunamigénica se harán un conjunto de simulaciones que permitan integrar las incertidumbres esperables en los mecanismos que intervienen, tales como, la profundidad del epicentro, la orientación de las roturas, el ángulo del plano de falla, o el salto de falla.

[11] Grupo de Investigación en Ecuaciones Diferenciales, Análisis Numérico Y Aplicaciones de la Universidad de Málaga

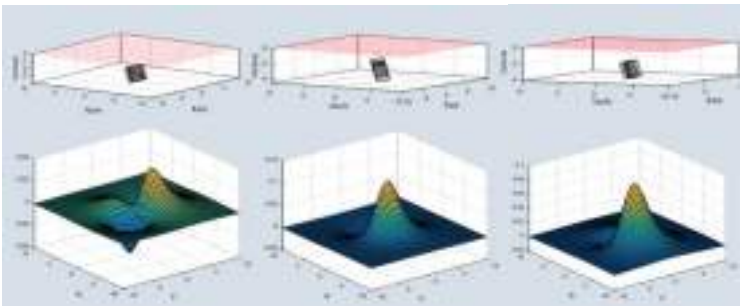


Figura 5. Simulación de la dislocación (desplazamientos en la vertical) en un área de 20x20 unidades el fondo oceánico según el modelo de Okada (1985) para una falla de dimensiones 3x2 unidades (largo x ancho) de dirección de buzamiento N90ºE con 70º para diferentes tipos de ruptura: a) cizalla pura senestral, b) inversa y c) normal.

La propagación de la onda y la inundación se simulan resolviendo la simplificación integrada en profundidad de las ecuaciones de Navier-Stokes. A esta simplificación bidimensional se la conoce como ecuaciones de Saint-Venant o de aguas someras. Dado el diferente tamaño de malla utilizado en la resolución numérica de las ecuaciones en derivadas parciales, la potencia de procesamiento necesario para el cálculo es también muy desigual. Así, mientras que para mar abierto los tiempos de cálculo son bastante contenidos como para poder aplicar este método en simulaciones para tiempo real, calcular la inundación resultante requiere tiempos de cálculo mucho mayores al trabajar en mallados más finos que recojan lo intrincado del terreno natural o urbano. En ensayos realizados en otros proyectos por el equipo IGME-SGN-UMA para la UNESCO se estimaba una ratio en el orden de 1 a 30, es decir, por cada unidad de tiempo de cálculo de propagación, se requieren 30 unidades de cálculo para inundación (con mallas anidadas desde 1 kilómetro en mar adentro hasta 2 metros en relieve emergido; Macías et al., 2017a Llorente et al. 2016).

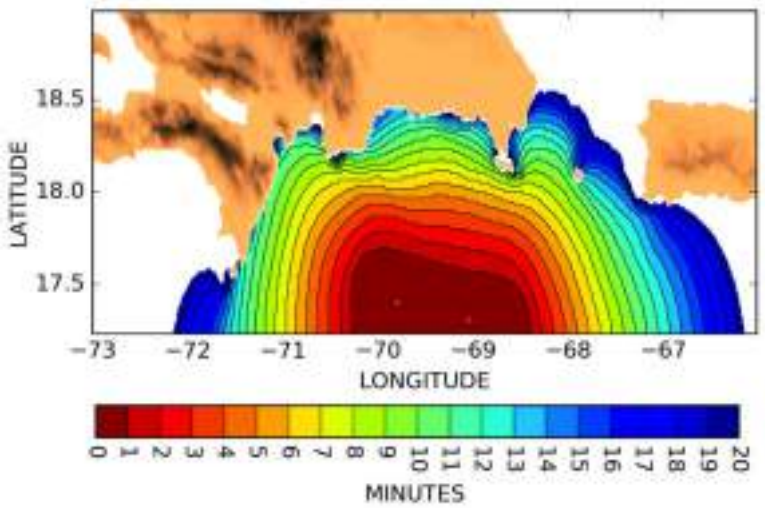


Figura 6. Ejemplo de tiempos de llegada. Fuente: Macías et al., 2017b.

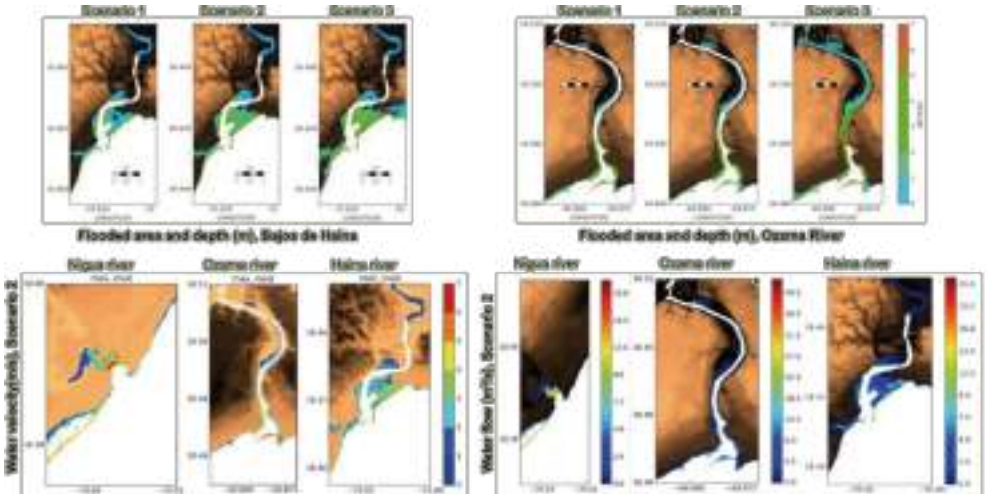


Figura 7. Ejemplos de distintos parámetros de inundabilidad para varios escenarios. Fuente: Macías et al., 2017b.

2.6. Cambio global y tsunamis

Durante el desarrollo del proyecto europeo NAIAD (ref. 730497, naiad2020.eu), una de las principales conclusiones es que la influencia antrópica, en muchos casos, excede en gran medida a las consecuencias que puedan derivarse del cambio climático. En el caso del riesgo por tsunamis, no se puede descartar que esto no sea así (Nagai et al. 2020), no obstante, hay varios factores a considerar que son específicos del ámbito costero en relación a la peligrosidad por tsunamis. Por un lado, el esperable aumento del nivel del mar genera una circunstancia con reflejo inmediato sobre las estimaciones de alcances, calados y velocidades de flujo esperables en zonas inundadas; pero no por ello es un efecto directo. Es decir, altera de manera significativa el dominio de cálculo, generando, posiblemente, nuevos efectos locales. A ello han de sumarse otros efectos costeros geológicos o antrópicos con potencial incidencia en el marco temporal de análisis del cambio climático (en el orden de los pronósticos a unos cincuenta o cien años vista, aproximadamente). Tales efectos pueden ser, entre otros, la reducción en la llegada de sedimento a las costas, las subsidencias o variaciones eustáticas costeras, la modificación en los patrones de oleaje y su influencia en la dinámica litoral. La consideración únicamente de la variable "nivel medio del mar" es relativamente fácil integrar en el cálculo, sin embargo, el resto de procesos naturales o antrópicos con efecto en el litoral, puede agravar o paliar los resultados, sin la mera consideración de la evolución en los bienes expuestos. El IGME está trabajando desde hace un año en una iniciativa de investigación paralela que permita evaluar de forma preliminar el grado de significancia de algunos de estos elementos en puntos pilotos del litoral español.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Siendo el objeto del proyecto la estimación de daños, el resultado principal será el dato de las pérdidas en términos monetarios de valor asegurado (propiedad mueble, inmueble y vida) expresado con la incertidumbre asociada. En este proyecto, como en toda iniciativa en la que intervenga la simulación de procesos naturales, la incertidumbre es una pieza esencial que debe ser manejada con atención, no sólo para dotar de la credibilidad necesaria al estudio, sino porque es gracias a la incertidumbre que se implantan distintos mecanismos de gestión. La incertidumbre es en particular interesante para el sector seguros en la medida en que este sector se alimenta de ella. En otras palabras, una pérdida cierta no es una pérdida asegurable.

Asociado a este producto, la cuantificación abstracta de "un evento de diseño conceptual" (sin el más mínimo ánimo de ser elementos de predicción o pronóstico), se generarán un conjunto de catálogos

de naturaleza cartográfica, tales como cartografías de peligrosidad por tsunamis cuasi generalizadas. La cartografía de peligrosidad, deberá integrar los elementos esenciales que permitan comprender la naturaleza del fenómeno en su distribución a lo largo de las costas. Esto se materializa con variables tales como los tiempos de llegada, las alturas máximas a una determinada profundidad o distancia de costa (o ambos), y distintos parámetros asociados a la inundación, siendo los dos más significativos: la extensión y el calado. Según resulte la complejidad en el número y el volumen de datos a generar, es posible que se representen otras variables (flujo máximo, velocidades máximas).

Dado que la geometría del modelo de simulación es una pieza clave y que, además, sirve para diversos propósitos y actores, un subproducto que se generará en el proyecto será el primer modelo topobatimétrico común de las Administraciones españolas para cuanto sea relativo a peligrosidad o riesgo por tsunamis. Este producto estará sujeto a la licencia más restrictiva de cualquiera de los catálogos que integren el modelo, al objeto de garantizar que cada institución interviniente no vea comprometidos, con motivo de esta iniciativa otros aprovechamientos de sus productos (investigación, seguridad marítima). Esta iniciativa será uno de los motores esenciales para el fortalecimiento de las redes de investigación y equipos técnicos entre distintos actores, que se espera que continúe alimentando el ya consolidado espíritu común de protección y servicio al ciudadano.

Otros productos que generará el proyecto no se liberarán hasta asegurar la debida confidencialidad de los datos de partida. Tal es el caso de los catálogos de exposición, de tasas de aseguramiento, de funciones de vulnerabilidad o similares.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Recientemente se han desarrollado trabajos de evaluación del riesgo de tsunami en España (Birkmann et al. 2010), pero no existe en la actualidad ningún estudio del impacto económico (cuantitativo) de la ocurrencia de un tsunami que pueda afectar a nuestras costas. En España y en Europa, existen distintas iniciativas relacionadas con los tsunamis, pero tan sólo se han desarrollado proyectos de inundabilidad para casos puntuales y concretos, aun estando amparados en iniciativas mayores (p.ej. Izquierdo et al. 2019, González et al. 2010). Los trabajos a escalas nacionales o supranacionales, o bien son directamente cualitativos, similar al concepto de *susceptibilidad* de otros procesos naturales (ESPON, 2005) o bien son cualitativos por expresarme mediante una variable cuantitativa que sirve de indicador (o proxy) del efecto del tsunami en costa como, por ejemplo, la altura de ola a una determinada distancia a la costa o una determinada isobata (el caso de tsumaps, isobata 50m). Un caso particular de estimación de daños económicos es el trabajo del Carreño y Seller (2005). En este estudio, partiendo de un conjunto de datos de elementos expuestos y haciendo algunas suposiciones preliminares, alcanza a dar estimación de pérdidas para la costa occidental de Huelva. Este trabajo es, quizá, uno de los primeros en la línea de evaluación de daños por tsunamis en España. Desde aquel trabajo, como se ha ido exponiendo a lo largo de este artículo, han cambiado mucho los catálogos de datos, y las herramientas y tecnologías que permiten avanzar en esta línea.

Desde este punto de vista, el proyecto aquí presentado es una propuesta innovadora y que dará respuesta a una necesidad: conocer el coste en la cobertura del seguro frente la catástrofe producida por un evento de tsunami tendrá lugar en España. Dado que no es posible determinar cuándo ni dónde se producirá el próximo evento, el resultado del proyecto no tiene carácter de pronóstico, sino de gestión.

Así mismo, es un proyecto que está abierto a la sinergia entre las distintas entidades, tanto públicas como privadas, dando lugar a una red de trabajo multidisciplinar entre distintas instituciones, y produciendo resultados que serán de gran aprovechamiento para todos.

REFERENCIAS

- Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina Cantos, J. (2002). *Riesgos Naturales*. Ariel, Barcelona.
- Birkmann, J., Teichman, K. V., Welle, T., González Rodríguez, E. M. & Olabarrieta Lizaso, M. (2010). The unperceived risk to Europe's coasts: tsunamis and the vulnerability of Cadiz, Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 10, 2659-2675. https://doi.org/10.5194/nhess-10-2659-2010
- Cantavella, J. V., González, C., Martínez-Solares, J. M. y Gaite, B. (2019). *The Spanish Tsunami Catalogue. Earthquakes and tsunamis in Iberia: 50th years of the 1969 Saint Vincent earthquake (M=8.0)*. 6th-8th March 2019 (Presentación pública en congreso internacional). Universidad Complutense de Madrid, Spain.
- Carreño, E. y Seller, A. (2005). Simulación de daños en la costa occidental de Huelva como consecuencia de tsunami. *Gerencia de riesgos y seguros*, 22(90), 23-40.
- Espejo Gil, F. (2017). El Consorcio de Compensación de Seguros y los tsunamis: La cobertura de los riesgos extraordinarios en España. *Expert meeting on tsunamigenic sources with potential impact in the Iberian coast, Balearic and Canary Islands*. Málaga, 6-7 Nov 2017 (Presentación pública en congreso internacional).
- ESPON (2005). *Europe tsunami hazard map. European Spatial Planning Observation Network (ESPON)*. preventionweb.net
- FEMA (2007). Benefit-Cost Analysis of FEMA Hazard Mitigation Grants. *Natural Hazards Review*, 97-111.
- González, M., Medina, R., Olabarrieta, M. y Otero, L. (2010). Tsunami Hazard assessment in the Southern coast of Spain. *Turkish Journal of Earth Sciences.* https://doi.org/10.3906/yer-0812-8
- IGME (2015). *QAFI v.3: Quaternary Active Faults Database of Iberia*. http://info.igme.es/QAFI
- IGN (2001). *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755). Monografía n. 19*. Ministerio de Fomento, Dirección General del IGN.
- IGN (2017). *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012*. https://doi.org/10.7419/162.05.2017
- IOC-UNESCO (2017). 10 years of the North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning and Mitigation System (NEAMTWS). *Accomplishments and Challenges in Preparing for the Next Tsunami*. Paris (Francia). Information Document 1340.
- Izquierdo, T., Abad, M., Rodríguez-Vidal, J., Ruiz, F. y González-Regalado, M. L. (2019). Análisis de la vulnerabilidad de las poblaciones costeras de la provincia de Huelva (suroeste de España) ante tsunamis. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32(1), 25-42.
- Krieger, K. y Demeritt, D. (2015). Limits of insurance as risk governance - Market failures and disaster politics in German and British private flood insurance. *LSE CARR Discussion Paper Series*.
- Leone, F., Lavigne, F., Paris, R., Denain, J. C. y Vinet, F. (2011). A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, 31(1), 363-375.
- Llorente, M. (2016). *Memoria de los trabajos de efectos cosísmicos: licuefacción, movimientos del terreno y tsunamis*. Proyecto: Estudio de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad física del Gran Santo Domingo. IGME.
- Llorente, M., Macías, J. y Muñoz, S. (2016): Informe sobre mapas de peligrosidad por tsunami e índice de vulnerabilidad de infraestructuras para la costa Sur de la República Dominicana. Informe del IGME-SGN-UMA para IOC/TSU-UNESCO, contrato n. 4500301291.
- Llorente, M. (2015). *GeoMEP. Modelo de evaluación de pérdidas por peligros geológicos. Aplicación al caso de las Islas Canarias*. IGME y CCS, Madrid.
- Llorente, M. y Macías, J. (2018). La necesidad y la oportunidad de estudiar el impacto económico de los tsunamis en las costas españolas. *Consorseguros Revista Digital*, 9. http://www.consorsegurosdigital.com/es/numero-09/

- Macías, J., Castro, M. J. y Escalante, C. (2020a). Performance assessment of Tsunami-HySEA model for NTHMP tsunami currents benchmarking. Laboratory data. *Coastal Engineering*, 158, 103667. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103667
- Macías, J., Castro, M. J., Ortega, S., Escalante, C. y González-Vida, J. M. (2017a). Performance benchmarking of Tsunami-HySEA model for NTHMP's inundation mapping activities. *Pure and Applied Geophysics*, 1-37. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1583-1
- Macías, J., Llorente, M., Ortega, S., Castro, M. J., González-Vida, J. M. y Muñoz, S. (2017b). *Numerical tool for tsunami risk assessment in the southern coast of the Dominican Republic*. AGU.
- Macías, J., Mercado, A., González-Vida, J. M., Ortega, S. y Castro, M. J. (2016). Comparison and numerical performance of Tsunami-HySEA and MOST models for LANTEX 2013 scenario. Impact assessment on Puerto Rico coasts. *Pure and Applied Geophysics,* 173(12), 3973-3997. https://doi.org/10.1007/s00024-016-1387-8
- Macías, J., Ortega, S., Castro, M. 0J. y González-Vida, J. M. (2020b). Performance assessment of Tsunami-HySEA model for NTHMP tsunami currents benchmarking. Field cases. *Ocean* Modelling, 152, 101645. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101645
- Marchal, R., Piton, G., Lopez-Gunn, E., Zorrilla-Miras, P., van der Keur, P., Dartée, K. W. J., Penga, P., Matthews, J. H., Tacnet, J. M., Graveline, N., Altamirano, M. A., Joyce, J., Nanu, F., Groza, I., Peña, K., Cokan, B., Burke, S. y Moncoulon, D. (2019). The (Re)Insurance Industry's Roles in the Integrationof Nature-Based Solutions for Prevention in DisasterRisk Reduction—Insights from a European Survey. *Sustainability*, 11, 6212. https://doi.org/10.3390/su1122621
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Sánchez, P. y Montes, J. A. (2019). Methodology for the damage assessment of vehicles exposed to flooding in urban areas. *J Flood Risk Management*, 12, e12475. https://doi.org/10.1111/jfr3.12475
- Martínez-Gomariz E., Forero-Ortiz E., Guerrero-Hidalga M., Castán, S. y Gómez, M. (2020). Flood Depth–Damage Curves for Spanish Urban Areas. *Sustainability*, 12(7), 2666. https://doi.org/10.3390/su12072666
- MHMC (2019). *Natural Hazard Mitigation Saves: 2019 Report. Multi-Hazard Mitigation Council*. Investigador Princiapl Porter, K.; Co-investigadores principales: Dash, N.; Huyck, C.; Santos, J.; Scawthorn, C.; Investigadores: Eguchi, M.; Eguchi, R.; Ghosh., S.; Isteita, M.; Mickey, K.; Rashed, T.; Reeder, A.; Schneider, P. y Yuan,J.; Directores, MMC. Investigador visitante: Cohen-Porter, A. National Institute of Building Sciences, Washington, DC.
- Nagai, R., Takabatake, T., Esteban, M., Ishii, H. & Shibayama, T. (2020). Tsunami risk hazard in Tokyo Bay: The challenge of future sea level rise. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101321.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y. & Smith, D. (2003). Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 377-389.
- Post, J., Zosseder, K., Strunz, G., Birkmann, J., Gebert, N., Setiadi, N. & Siagian, T. (2007). *A paper for the international symposium on disaster in Indonesia, Padang, Indonesia,* 26-29.
- Rodgers, K. P. (1991). *Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños*. Organización de los Estados Americanos (OEA).
- Teh, S. Y., Koh, H. L., Moh, Y. T., DeAngelis, D. L. & Jiang, J. (2011). Tsunami risk mapping simulation for Malaysia. *WIT Transactions on The Built Environment*, 119, 3-14.

ENFOQUE PROBABILÍSTICO PARA LA SEGURIDAD HIDROLÓGICA DE INFRAESTRUCTURAS

Alvaro Sordo-Ward
PCD, Universidad Politécnica de Madrid, España
alvaro.sordo.ward@upm.es

Iván Gabriel-Martín
Doctorando, Universidad Politécnica de Madrid, España
i.gabriel@upm.es

Luis Garrote de Marcos
CU, Universidad Politécnica de Madrid, España
l.garrote@upm.es

RESUMEN

En España, para el estudio de la seguridad hidrológica de presas, se adopta el criterio de periodo de retorno asociado a las Avenidas de Proyecto. En la definición de la Avenida de Proyecto, a excepción de la obtención de la Tormenta de Proyecto, la mayoría de las variables involucradas se toman como determinísticas, cuando en realidad tienen un carácter estocástico. Variables como el reparto temporal de la lluvia o las condiciones de humedad antecedentes a la avenida son, entre otras, fijadas de manera determinista por el proyectista a pesar del grado de incertidumbre existente sobre la determinación de éstas. Gracias a los avances en informática, la modelación probabilística presenta una alternativa para abordar estas cuestiones, permitiendo simular los procesos hidrológicos de manera detallada, tanto temporalmente, como espacialmente. Además, existen otros factores extrínsecos no contemplados en la definición del periodo de retorno de las avenidas asociados a la seguridad hidrológica de la presa, como son el nivel inicial en el embalse, o la operación y disponibilidad de los distintos órganos de desagüe de la presa. Este artículo presenta metodologías dentro de un entorno de modelación estocástica, que mejoran: a) la generación estocástica de avenidas, b) la operación de los órganos de desagüe en situación de avenida, c) el análisis de la influencia de variables operacionales (nivel inicial en el embalse y probabilidad de fallo de los órganos de desagüe) y d) la definición de resguardos estacionales en presas teniendo en cuenta la operación ordinaria de la mismas.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Seguridad hidrológica de la presa y en el curso de agua aguas abajo

El fallo de las presas es una preocupación en muchos países debido a las consecuencias económicas y sociales asociadas a dichas catástrofes. Al diseñar una presa, los ingenieros suelen aplicar técnicas para garantizar que el riesgo asociado al fallo de la presa sea muy bajo, y los estándares se aplican de manera diferente según el país en el que se encuentra la presa (Rettemeier y Köngeter, 1998; Ren et al, 2017). Aunque el riesgo que se asume es bajo, el mismo debe reevaluarse de forma periódica, ya que las regulaciones legales, las condiciones climáticas, las características de la cuenca y la presa pueden variar a lo largo del tiempo (Fluixá-Sanmartín et al, 2018).

En la práctica profesional habitual, la evaluación de la seguridad hidrológica de la presa y la seguridad aguas abajo para un período de retorno determinado se analiza con métodos deterministas. Se obtiene un hidrograma de inundación de diseño y se transita a través del sistema embalse-presa asumiendo

un nivel de embalse constante antes de la llegada de la inundación e igual al nivel de operación máximo normal. La avenida de diseño se utiliza para el diseño de los órganos de desagüe de las presas sin tener en cuenta ningún coeficiente de seguridad como es habitual en otros tipos de estructuras. La avenida de diseño en España está asociada con el período de retorno de la precipitación total acumulada en 24 horas, caracterizando así el riesgo asociado y, por lo tanto, la seguridad de la presa (Sordo-Ward et al., 2012). El uso extendido de esta metodología se ha debido a su fácil aplicación y pocos requisitos de información. Sin embargo, los avances científicos en el campo de la hidrología combinados con un aumento en la capacidad computacional, el desarrollo de sistemas de información geográfica y procesos de modelado espacial han permitido proponer modelos estocásticos para la caracterización extrema del comportamiento hidrológico de las cuencas.

Numerosas variables involucradas en hidrología tienen una naturaleza estocástica (Carvajal et al., 2009; Sordo-Ward et al., 2013). En las últimas décadas, numerosos autores propusieron enfoques probabilísticos que muestran la aleatoriedad asociada con diferentes variables (por ejemplo: Eagleson, 1972; Arnaud y Lavabre, 2002; De Michele et al., 2002, 2005; Carvajal et al., 2009; Sordo-Ward et al., 2012; 2013; Paquet et al., 2013; Bianucci et al., 2013, 2015; Flores-Montoya et al., 2015, 2016).

El control de inundaciones tiene dos objetivos fundamentales, que son garantizar la seguridad de la presa, evitando que se exceda el nivel máximo del embalse, así como minimizar el daño causado por las inundaciones aguas abajo de la presa. Varios autores (Mediero et al., 2010; Bianucci et al., 2013; Serrano-Lombillo et al., 2012a; Aranda Domingo, 2014; Micovic et al., 2016; Michailidi y Bacchi, 2017) señalaron que la seguridad hidrológica de las presas y la seguridad aguas abajo debe evaluarse analizando los períodos de retorno de los niveles máximos de agua del embalse y las salidas máximas del embalse, respectivamente. De esta forma, el análisis de seguridad de la presa hidrológica no solo depende del forzamiento hidrológico, sino también de las características y reglas de operación de la presa y el embalse.

1.2. Solicitaciones hidrológicas

En lo que respecta a los métodos de estimación de avenidas, existen numerosos criterios de clasificación basados en: el origen de la información a ser considerada (basada en datos de lluvia o caudal), metodología de cálculo (determinista o probabilística), resultados esperados (caudales máximos o hidrogramas), alcance temporal (métodos continuos o basados en eventos), entre otros.

En España, las directrices técnicas para la seguridad de presas (SPANCOLD, 1997) definen dos grandes grupos, el tipo determinista y el tipo probabilístico. En estos grupos, se entiende que el método determinista es aquel que calcula la avenida máxima a partir de datos meteorológicos e hidrológicos. En este grupo, se resalta el método de la “Avenida máxima probable” (USACE, 1991). Se consideran métodos probabilísticos aquellos que llevan a cabo un estudio basado en los datos disponibles (lluvia y/o caudal) y determinan caudales máximos e hidrogramas de avenida para diferentes períodos de retorno. Este último es el que se aplica actualmente en España.

Esta metodología permite caracterizar el riesgo hidrológico en función del caudal máximo, pero hay otros factores que influyen en la respuesta de la presa y el embalse a las avenidas. De hecho, todo el hidrograma es de interés para el diseño y la evaluación de la seguridad hidrológica de las presas. El hidrograma debe ser transitado por el embalse y evacuado a través de los aliviaderos de la presa para saber cómo se transforma en una serie de salidas y diferentes variaciones de nivel en el embalse. Por esta razón, el análisis univariado de los caudales máximos debe extenderse a un análisis multivariado que tenga en cuenta otras variables como el volumen y la duración que permiten la construcción de hidrogramas completos.

Las regulaciones nacionales de diferentes países establecen un período de retorno para el diseño de presas (en España de 500 a 10,000 años) (Rettemeier y Köngeter, 1998; Ren et al, 2017). Sin embargo, no especifican si el período de retorno está asociado con el caudal máximo, el volumen del hidrograma o el hidrograma completo. Los períodos de retorno de diseño se asocian comúnmente al período de retorno del hidrograma de avenida de diseño, considerando que los eventos de lluvia generan hidrogramas con el mismo período de retorno. Numerosos autores han mostrado que esta consideración no necesariamente es cierta (por ejemplo: Adams y Howard, 1986; Alfieri et al., 2008; Viglione y Blösch, 2009; Sordo-Ward et al., 2014). También es bien sabido que los períodos de retorno asociados a los caudales máximos de entrada al embalse no son los mismos que los asociados al volumen del hidrograma, existiendo una tendencia a analizar este problema mediante el uso de cópulas para el análisis multivariado de frecuencia de avenidas (por ejemplo: De Michele et al., 2002 ;Salvadori et al., 2011; Requena et al., 2016; Aranda Domingo, 2014). Esta pregunta puede extenderse al período de retorno asociado a la seguridad hidrológica de las presas. Además, el riesgo asociado con un evento puede estar infravalorado (o sobrevalorado) si solo se analiza el período de retorno asociado con una de las variables que caracterizan el hidrograma (De Michele et al., 2002; Salvadori et al., 2011). El período de retorno debe definirse en términos del riesgo asociado con el desbordamiento de la cresta de la presa o con el daño aguas abajo, en lugar de en términos de la probabilidad de ocurrencia de eventos naturales, para tener en cuenta las características del embalse, la presa y sus aliviaderos (Mediero et al., 2010; Bianucci et al., 2013; Serrano-Lombillo et al., 2012a; Aranda Domingo, 2014; Micovic et al., 2016; Michailidi y Bacchi, 2017).

Para caracterizar el forzamiento hidrológico, se pueden aplicar varios métodos y se clasifican principalmente según dos grupos principales: análisis estadístico de frecuencia de avenidas, y métodos de simulación de avenidas.

Los métodos estadísticos necesitan largas series de registros de caudales (apenas disponibles (Zhang y Shing, 2017; Klein et al., 2010)), tienen el inconveniente de la incertidumbre asociada con el ajuste de la función de distribución para períodos de retorno grandes (Katz et al., 2002), y proporcionar un valor de caudal máximo, volumen o duración, pero no la forma del hidrograma. Además, cuando se aplican en cuencas no aforadas, los procesos físicos que ocurren en la cuenca no suelen considerarse y aumenta la incertidumbre sobre la estimación de los cuantiles de las avenidas (Salinas et al., 2013). Los métodos de análisis de frecuencia de avenidas derivados se pueden dividir según dos grupos: simulación continua y basada en eventos.

El uso de un modelo hidrológico distribuido continuo brinda al usuario la posibilidad de derivar distribuciones de frecuencia de avenidas con caudales continuos y obtenido en cualquier punto de la red de drenaje de la cuenca al forzar el modelo hidrológico distribuido con un generador de clima estocástico. Este enfoque tiene la ventaja de estimar las variables para todo el período de simulación. Sin embargo, los modelos continuos tienden a ser más complejos que los modelos basados en eventos, con esfuerzos computacionales que podrían ser muy intensivos, incluso cuando se utilizan procesos de computación y paralelización de alto rendimiento.

Por otro lado, las simulaciones basadas en eventos requieren tiempos de simulación mucho más cortos. Sin embargo, estos métodos se basan en el supuesto de que el hidrograma de avenida tiene el mismo período de retorno que el evento de tormenta asociado, que (como se expuso anteriormente) no es realista. Además, diferentes propiedades de los eventos de tormenta podrían afectar la derivación de las curvas de frecuencia de avenidas: distribución temporal de la lluvia, duración del evento, intensidad máxima y profundidad total de la tormenta, entre otros.

Se pueden encontrar ejemplos de ambos enfoques de análisis de frecuencia de avenidas derivados en la literatura existente. En el caso de los enfoques basados en eventos, algunos estudios han combinado

generadores de tormenta estocásticos no complejos (por ejemplo, Sordo-Ward et al., 2012; 2013) o generadores de lluvia complejos (por ejemplo, Foufoula-Georgiou, 1989); con modelos semidistribuidos (por ejemplo, Franchini et al., 1996) o distribuidos (por ejemplo, Flores-Montoya et al., 2016). En el caso de las simulaciones continuas, para reducir el costo computacional, la mayoría de los autores han trabajado con modelos agregados o semidistribuidos (por ejemplo, Brocca et al., 2013), y algunos de ellos han trabajado con modelos utilizando computadoras de alto rendimiento (Blazkova y Beven, 2004; Vivoni et al., 2011).

Para superar las limitaciones en los dos enfoques, varios autores han propuesto combinar modelos basados en eventos con modelos continuos. Paquet et al. (2013) propuso el modelo SCHADEX, que consiste en reemplazar los eventos de lluvia estocásticos dentro de una simulación continua corta con datos observados y un marco de Monte Carlo. Li et al. (2014a) desarrollaron el enfoque híbrido-CE, que consiste en combinar simulaciones continuas a largo plazo de lluvia y simulaciones hidrológicas cortas y continuas para caracterizar probabilísticamente la lluvia y la humedad inicial del suelo (respectivamente) para así forzar un modelo basado en eventos. Ambos estudios utilizaron modelos agrupados.

1.3. Operación del aliviadero

El objetivo de la gestión de avenidas es garantizar la seguridad de la presa, minimizar las inundaciones aguas abajo y mantener la capacidad operativa completa de los embalses una vez que termina una avenida (Wurbs, 2005; Wang et al., 2010). Las presas con aliviaderos con compuertas representan alrededor del 30% de las grandes presas en todo el mundo (ICOLD, 2003), y ofrecen más posibilidades de conservación del agua y posibilidad de gestión de avenidas que aquellas con aliviaderos de labio fijo (Sordo-Ward et al., 2013). La gestión de las compuertas durante un evento de avenida representa un desafío para el operador de la presa, que toma decisiones bajo presión y en condiciones inciertas. Además, el plazo para la toma de decisiones suele ser extremadamente corto, la información disponible es generalmente escasa y la previsibilidad de la situación meteorológica es limitada (Molina et al., 2005). Las operaciones de control de inundaciones en tiempo real en las represas han sido históricamente abordadas mediante reglas predefinidas obtenidas mediante técnicas de simulación (Li et al., 2014), o mediante métodos de simulación como el Método de Evaluación Volumétrica (MEV, Girón, 1988), comúnmente utilizado en España. Las reglas de operación suelen estar diseñadas y evaluadas por modelos de simulación, que generalmente son más flexibles y fáciles de interpretar para los operadores de represas que otros esquemas, como la optimización (Needham et al., 2000; Rahman y Chandramouli, 1996; Oliveira y Loucks, 1997; Bianucci et al., 2013) o modelos de aprendizaje basados en datos (Chang y Chang, 2006; Chang et al., 2010; Cuevas Velásquez, 2015).

Se han desarrollado varios esquemas de simulación para abordar este problema. El software HEC-ResSim (Klipsch y Hurst, 2007) permite obtener el caudal de salida para cada paso de tiempo, teniendo en cuenta las reglas de operación y simulando el comportamiento del embalse. Otros modelos integran la operación del embalse en tiempo real con el pronóstico de avenidas. Explican la incertidumbre asociada con las solicitaciones hidrológicas, analizando diferentes técnicas de pronóstico para las entradas en los embalses e incluyendo enfoques deterministas y probabilísticos (Zhao et al., 2011).

Las mejoras en el campo de la optimización y el aprendizaje basado en datos permiten un enfoque del problema que explica la incertidumbre de las solicitaciones hidrológicas en el pronóstico en tiempo real (Liu et al., 2015) y permite el desarrollo de reglas de operación que incorporan diferentes objetivos (El-Shafie et al., 2014; Ahmadi et al., 2014). La mayoría de los métodos de optimización se basan en una función objetivo, que minimiza los caudales de salida del embalse y los niveles máximos alcanzados en el mismo (Bianucci et al., 2013). Sin embargo, todavía hay una brecha entre

el desarrollo teórico y la implementación práctica de estos modelos (Ahmed y Mays, 2013). Los modelos de optimización generalmente son limitados ya que dependen de parámetros específicos (funciones de penalización y coeficientes de la función objetivo, entre otros) que necesitan la experiencia del operador en programación matemática (Bianucci et al., 2013). Además, debido a la incertidumbre asociada con las solicitaciones hidrológicas y las limitaciones del pronóstico de inundaciones, los administradores de presas generalmente prefieren métodos de simulación (Jood et al., 2012).

1.4. Nivel inicial en el embalse

El campo de la evaluación del riesgo de presas ha evolucionado en todo el mundo, con la aparición de diferentes guías y procedimientos en varios países (ANCOLD, 2003; USACE 2011; SPANCOLD, 2012) para apoyar a los operadores de la presa en el proceso de toma de decisiones relacionadas con la seguridad de la presa. También es bien sabido que, debido a la alta variabilidad de los procesos naturales, la evaluación de la seguridad de la presa introduce incertidumbres que deben evaluarse como parte del proceso. Sin embargo, analizar esta incertidumbre es una tarea compleja (Bianucci et al., 2015; Sordo-Ward et al., 2014).

Además, las acciones humanas también proporcionan fuentes adicionales de incertidumbre para el análisis. Una de esas variables relacionadas con las acciones humanas es la variabilidad del nivel inicial del embalse, debido a su conexión con la operación del embalse. A medida que los niveles del embalse fluctúan (cuando llega una avenida, el embalse puede estar parcialmente lleno), la suposición de considerar el embalse lleno antes de un evento de avenida podría ser conservadora en el análisis de seguridad hidrológica (Carvajal et al., 2009). Sin embargo, este supuesto es una práctica comúnmente implementada entre los diseñadores de presas y en las directrices técnicas nacionales (Bianucci et al., 2013). Por lo tanto, muchos autores consideraron el nivel inicial del depósito como constante (por ejemplo: Hsu et al., 2011; Serrano-Lombillo et al., 2012b; Sordo-Ward et al., 2012; 2013; Bianucci et al., 2013), aunque algunos consideran su variabilidad (De Michele et al., 2005; Carvajal et al., 2009; Peyras et al., 2012; Aranda et al., 2014; Micovic et al., 2016). Todos los estudios mencionados anteriormente concluyeron que es deseable tener en cuenta las fluctuaciones de los niveles de los embalses en la seguridad hidrológica de la presa, además, cuando la presa se opera en forma estacional, como es el caso de los embalses cuyo uso principal es el riego, independientemente del aliviadero y la tipología de la presa.

1.5. Definición del volumen máximo de resguardo en embalses

Debido a las exigencias de la sociedad, se imponen requisitos de seguridad hidrológica cada vez más estrictos a las presas para cumplir con las nuevas normativas y evitar que las mismas fallen (Bocchiola y Rosso, 2014). Este problema puede abordarse con dos tipos de soluciones técnicas: soluciones estructurales, que podrían ser la remodelación de aliviaderos de presas o la elevación del nivel de coronamiento de la misma; y soluciones no estructurales como la asignación de volúmenes adicionales para el control de inundaciones. Las soluciones estructurales aumentan la capacidad de control de inundaciones mientras mantienen el almacenamiento disponible para el suministro de agua. Sin embargo, su principal inconveniente es la necesidad de asignar recursos para obras de infraestructura. Por otro lado, la implementación de soluciones no estructurales es más fácil y rápida, pero puede reducir la garantía de suministro al sistema.

La asignación del volumen de control de inundaciones se aborda definiendo un nivel máximo de conservación. Dicho nivel es el nivel operativo máximo que el embalse puede alcanzar en condiciones normales de operación. Este nivel de embalse está por debajo del nivel máximo normal de operación y puede variar a lo largo de las estaciones del año.

Tradicionalmente, los profesionales solo se centraron en la seguridad hidrológica de la presa y la

seguridad aguas abajo al definir los niveles máximos de conservación, sin tener en cuenta otros fines del embalse, como el suministro de agua. Esto puede implicar consecuencias económicas relacionadas con la garantía de suministro de la demanda de agua (Solera-Solera et al., 2012).

Algunos autores se han centrado en la contabilidad simultánea tanto de la operación regular (asociada a los propósitos de suministro de agua del embalse) como del control de inundaciones al definir los niveles máximos de conservación. Liu et al. (2015) propuso una metodología para definir los niveles máximos de conservación estacionales que representan tanto el control de inundaciones como el suministro de agua y Chang et al. (2017) definieron los niveles máximos de conservación subestacionales variables para incrementar los beneficios de la energía hidroeléctrica mediante el uso de técnicas de lógica difusa. Otros autores han estudiado los niveles máximos de conservación estacionales dentro de enfoques deterministas (Chen et al., 2013; Moridi y Yazdi, 2017; Xie et al., 2018).

Tener en cuenta todas las variables operativas (es decir, la variabilidad del nivel del embalse) en la presa y la seguridad aguas abajo proporciona resultados más realistas, lo que en consecuencia puede conducir a una mejor definición de los niveles máximos de conservación.

2. ESTUDIOS DE CASO

Los siguientes apartados desarrollan partes específicas del enfoque propuesto que se pueden combinar según el esquema conceptual de la Figura 1. Con el objetivo de desarrollar una metodología estocástica para evaluar la seguridad hidrológica de la presa y la seguridad aguas abajo, y teniendo en cuenta variables operativas, se muestran estudios de caso, resultado de los diferentes estudios de investigación realizados por nuestro grupo de investigación.

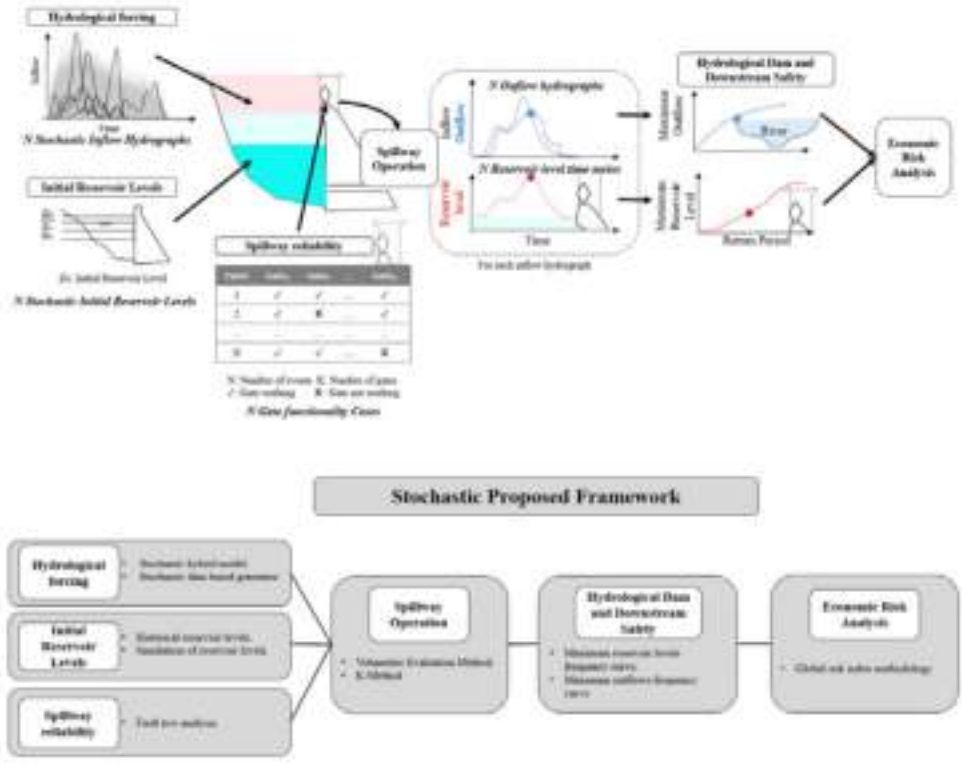


Figura 1. Marco estocástico propuesto para la evaluación de la seguridad hidrológica de la presa y aguas abajo. Fuente: tesis doctoral de Iván Gabriel-Martín.

2.1. Solicitaciones hidrológicas: el método híbrido

El método híbrido se basa en los resultados obtenidos del estudio del criterio de selección de tormentas y las condiciones iniciales de humedad del suelo. La Figura 2 muestra un esquema general del marco de modelado y la metodología del modelo híbrido.

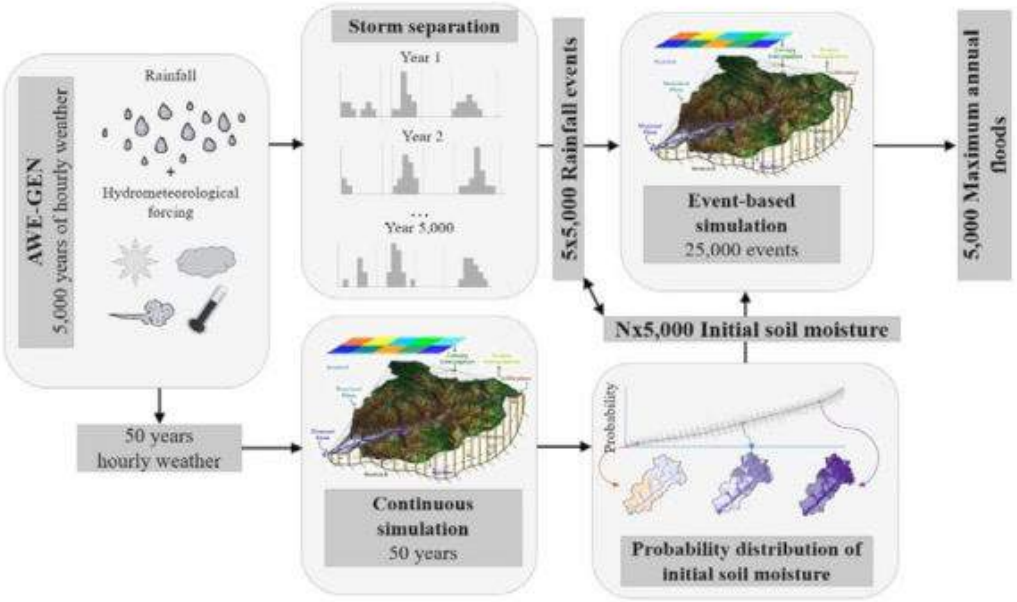


Figura 2. Esquema general del método híbrido. Fuente: tesis doctoral de Iván Gabriel-Martín.

En primer lugar, se genera un conjunto continuo de series horarias de solicitaciones climáticas de 5,000 años utilizando un generador de clima estocástico. El generador meteorológico estocástico elegido es AWE-GEN (Advanced Weather Generator (Fatichi et al., 2011)). Posteriormente, se realiza una simulación continua de 50 años de la serie climática generada con tRIBS (Ivanov et al., 2004a). Simultáneamente, la separación de los eventos de tormenta se realiza aplicando el método exponencial (Restrepo-Posada y Eagleson, 1982) a la serie climática de 5,000 años. Se consideran los 5 eventos principales de cada uno de los 5,000 años en términos de magnitud total, se simulan en un marco basado en eventos en tRIBS, asignando un valor de estado de humedad inicial para la cuenca usando un marco Monte Carlo. Este valor inicial de humedad del suelo se obtiene de la probabilidad distribución de los valores iniciales de humedad del suelo de todos los eventos dentro de ese mes en la simulación continua de 50 años. Finalmente, los hidrogramas anuales máximos se obtienen en términos de caudal máximo y volumen máximo, y se derivan las curvas de frecuencia asociadas. Para validar el método, los resultados obtenidos por el método híbrido se comparan con los obtenidos derivando las curvas de frecuencia de avenidas de la simulación continua de 5,000 años, analizando (a) el caudal máximo anual y (b) el volumen máximo anual. El método híbrido se aplicó a la cuenca de Peacheater Creek en Oklahoma, USA.

Un resumen de los resultados se presenta en la Figura 3.

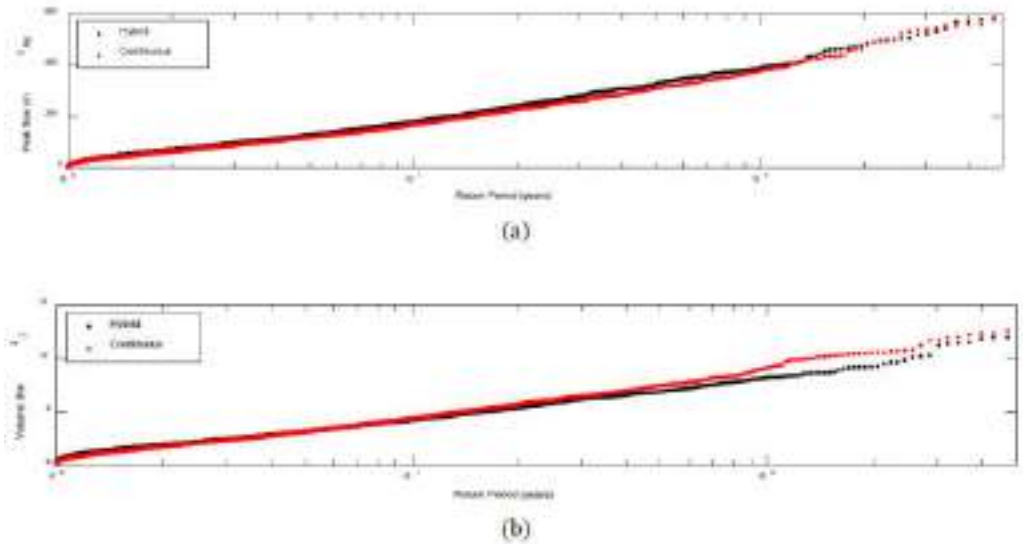


Figura 3. Análisis de la distribución de frecuencia de los caudales máximos anuales (a) y volúmenes máximos anuales (b). Los puntos negros muestran los resultados obtenidos por el método híbrido y los puntos rojos muestran los resultados obtenidos con la simulación continua. Fuente: tesis doctoral de Iván Gabriel-Martín.

Se observa que, en el caso de los caudales máximos, existe un excelente ajuste entre las curvas de frecuencia del método continuo y del método híbrido (Figura 3a). Al analizar la curva de frecuencia de volumen máximo anual, se observa cómo el método híbrido subestima los volúmenes máximos anuales para períodos de retorno de más de 100 años (Figura 3b). En el caso de la curva de frecuencia de caudal máximo, el coeficiente de ajuste Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) tiene un valor de 0.98; mientras que, en el caso de la curva de frecuencia de volumen máximo anual, el coeficiente de Nash-Sutcliffe es 0.97.

Mediante el uso de un generador estocástico climático horario y un modelo hidrológico distribuido físicamente basado, el método híbrido reproduce las curvas de frecuencia de los caudales máximos y los volúmenes máximos anuales y sus características: magnitud univariada y recurrencia de los caudales y volúmenes máximos anuales máximos, su estacionalidad, su dependencia y sus propiedades estadísticas bivariadas. El modelo representa estos resultados de manera precisa, reduciendo los tiempos de cálculo de meses a horas. Esta metodología se ha aplicado al estudio de caso de Peacheater Creek, concluyendo que:

1. La independencia entre los eventos de lluvia y las condiciones hidrológicas previas de humedad del suelo se ha demostrado en el marco del método híbrido desarrollado.
2. El método híbrido preserva la dependencia y las propiedades bivariadas de las avenidas derivadas de la simulación continua. La correlación entre los caudales máximos anuales y los volúmenes se conserva de manera similar al enfoque de modelado continuo. El rho de Spearman se obtiene con un error relativo inferior al 7%, mientras que la tau de Kendall difiere alrededor del 13% con respecto a los valores obtenidos mediante modelado continuo. Al estimar el parámetro de la familia de cópulas Gumbel seleccionado, el error relativo fue inferior al 13%. Con respecto al período de retorno de Kendall, el período de retorno de Kendall de 10 es muy similar a los obtenidos por simulación continua. Sin embargo, para el período de retorno de Kendall de 50 y 100 años, el método híbrido sobreestima los valores de volumen, teniendo un buen acuerdo con los caudales máximos.
3. El método híbrido propuesto es capaz de reproducir las curvas de frecuencia de avenida univariadas con un buen ajuste respecto a las obtenidas por la simulación continua. La curva de frecuencia de caudal máximo anual se obtiene con un coeficiente Nash-Sutcliffe de 0.98, mientras

que la curva de frecuencia máxima anual de volumen se obtiene con un valor de Nash-Sutcliffe de 0.97.

4. El método híbrido propuesto reduce el tiempo de cálculo de las simulaciones continuas de dos meses y medio a catorce horas de cálculo para la cuenca de Peacheater Creek (debido a la simulación continua de 50 años). Con respecto a las simulaciones basadas en eventos, se realizaron con menos de una hora de cálculo.

2.2. Operación de compuertas de aliviaderos: el Método K (K-Method)

Uno de los métodos más utilizados en España para la gestión de avenidas en presas con compuertas es el Método de Evaluación Volumétrica propuesto por Fernando Girón en 1988 (VEM, Girón, 1988). La principal ventaja del VEM es su simplicidad. Sin embargo, es un método fijo, en el sentido de que no se puede adaptar a las condiciones específicas de la cuenca, el embalse o el aliviadero, aparte del control del volumen de la avenida. El Método K, basado en el VEM, propone la aplicación de un parámetro correctivo K a las expresiones que rigen las reglas de operación de la presa mientras el nivel del embalse está aumentando. Al variar el parámetro K, se cambia la proporción en la que se incrementan los caudales de vertido, hasta que se alcanza el nivel máximo de avenida de proyecto (FCL). Además, se incluyen varias mejoras al VEM, entre ellas: (1) más zonas de embalse para evitar cambios abruptos de los caudales de salida; (2) un caudal vertido de alerta (OALT) como el caudal máximo admisible para evitar daños aguas abajo; y (3) un gradiente máximo de apertura / cierre de compuertas (Omax.Gr). La Figura 4 muestra el esquema general de la implementación del Método K.

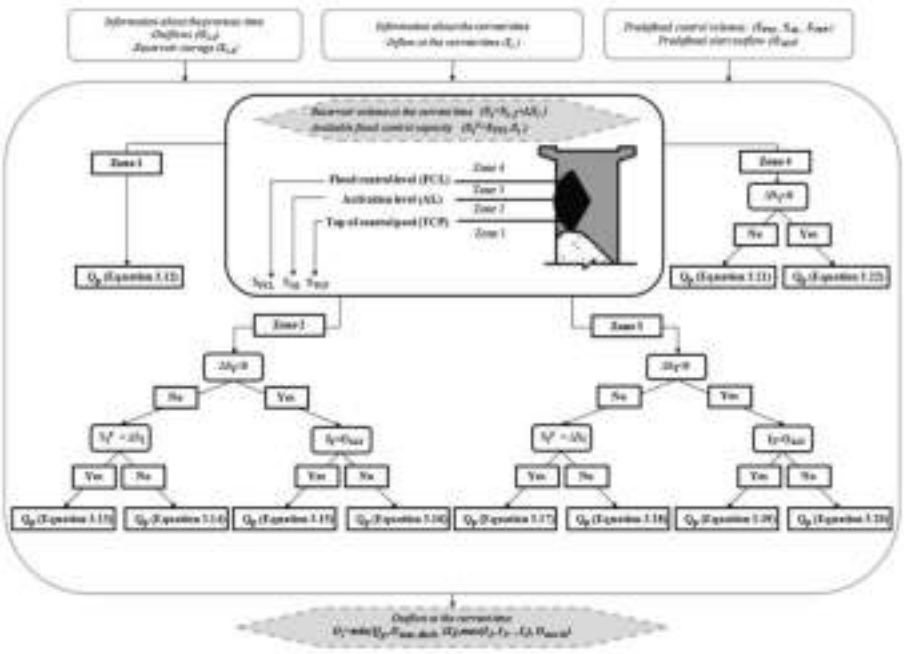


Figura 4. Esquema general del Método K. Fuente: tesis doctoral de Iván Gabriel-Martín.

El método define tres niveles característicos y volúmenes de embalse, los TCP y FCL mencionados anteriormente, e incorpora el nivel de activación en el esquema (AL, el volumen correspondiente es SAL). El nivel de activación es el nivel del embalse en el que cambian las reglas de operación, aumentando los caudales de salida. Los niveles característicos mencionados anteriormente determinan cuatro zonas: 1, 2, 3 y 4 (Figura 4). El caudal de salida propuesto (Qp) se determina en función de Si (volumen de embalse en el instante i), la zona correspondiente (1, 2, 3 o 4), y si el almacenamiento del embalse está aumentando ($\Delta Si = Si - Si - 1 \geq 0$) o disminuyendo ($\Delta Si < 0$).

La metodología propuesta se aplicó a una presa ubicada en la cuenca del río Segura, el embalse de Talave. Esta presa se encuentra en la provincia de Albacete, en el sureste de España, y pertenece a la cuenca del río Mundo. La cuenca del Talave tiene un área de 766.5 km^2. El clima de la región es mediterráneo (precipitación media anual de 557 mm). Los objetivos principales del embalse son la regulación de inundaciones, la generación de energía hidroeléctrica y el suministro de agua para la Región de Murcia.

Se implementó un enfoque probabilístico, que combina un entorno de Monte Carlo y reglas de operación deterministas de control de inundaciones para presas con aliviaderos con compuertas (Figura 5). Los principales componentes del proceso son:

- Generación de lluvia y un modelo hidrometeorológico. Se construyó un entorno de Monte Carlo para generar un conjunto de tormentas y se utilizaron sus correspondientes hidrogramas como la entrada al embalse. Se generó un conjunto de 100,000 hidrogramas de entrada aplicando la metodología desarrollada por Sordo-Ward et al. (2012)
- Tránsito de inundaciones en el embalse y la operación del embalse y la presa mediante la aplicación de VEM, el Método K, I-O (Bianucci et al. 2013) y MILP (Bianucci et al. 2013). El método K propuesto se comparó con VEM, para evaluar la mejora del rendimiento. También se utilizaron otros dos métodos para referencias como casos extremos: el Método de entrada y salida de caudal (I-O) y el método de Programación lineal entera mixta (MILP) propuesto por Bianucci et al. (2013). El I-O es un esquema muy simple que intenta mantener el nivel del embalse igualando las salidas del embalse con las entradas del mismo mientras las compuertas están parcialmente abiertas, por lo que no se logra un efecto de atenuación de inundación durante la fase controlada de la operación de la presa.

Por otro lado, el método MILP es un método de optimización total que logra el mejor manejo posible de un hidrograma de entrada, de acuerdo con una función objetivo determinada. Representa una gestión perfecta bajo la suposición poco realista de un conocimiento completo del hidrograma de entrada y, por lo tanto, se toma como referencia para una mejora máxima.

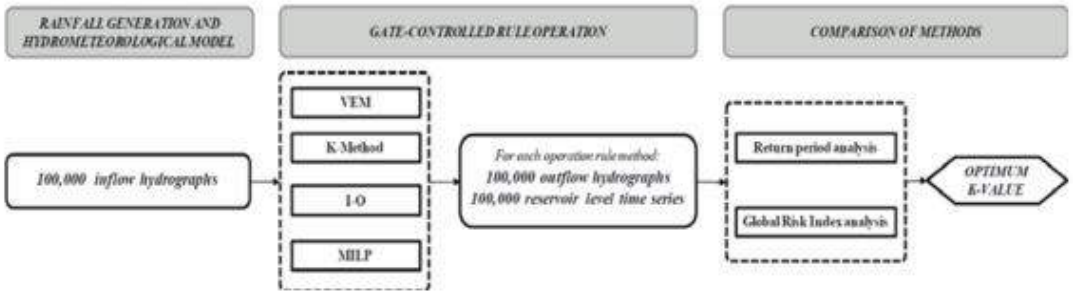


Figura 5. Esquema del enfoque probabilístico propuesto. Fuente: tesis doctoral de Iván Gabriel-Martín.

Una vez que se aplicaron las diferentes reglas de operación controladas por las compuertas, se seleccionó el nivel máximo alcanzado en el depósito (ZMAX) y el caudal máximo de salida aguas abajo (OMAX) como variables representativas para una comparación del rendimiento de los métodos.

Se implementó un esquema comparativo organizado en cuadrantes, que mostró el aumento (o disminución) del nivel máximo del reservorio y el caudal máximo de salida en comparación con el VEM. Los puntos ubicados en el cuadrante superior derecho (QI) representan eventos en los que el

nivel máximo alcanzado en el embalse y el caudal de salida máximo fueron más altos que al aplicar el VEM. Los puntos ubicados en el cuadrante superior izquierdo (QII) muestran una situación intermedia, con niveles máximos más bajos pero salidas más altas. El cuadrante inferior izquierdo (QIII) representa casos en los que tanto el nivel máximo como el caudal de salida máximo fueron más bajos que al aplicar el VEM (es decir, la mejor situación). El cuadrante inferior derecho (QIV) representa situaciones intermedias con niveles máximos más altos y caudales vertidos máximos más bajos.

Por ejemplo, la mediana de ZMAX disminuyó de 509.8 a 509.5 m y la mediana de OMAX aumentó de 111 a 118 m^3/s para K = 1 (VEM) y K = 10, respectivamente (Figura 6 (a3 – b3)). Para valores de K superiores a diez, la mediana de ZMAX disminuyó a 509.3 m para K = 50, mientras que la mediana de OMAX aumentó a 124 m^3/s para K = 50.

Para valores de Tr que varían de 50 a 100 años, más del 99% de los casos analizados se incluyeron en QIII para valores de K de 1.25 a 6.5, más del 92% para valores de K inferiores a diez, y esto disminuyó a 17% para K = 50. La mediana de ZMAX disminuyó de 509.9 m para K = 1 (VEM), a 509.5 m para K = 10 y 509.3 m para K = 50. (Figura 6 (a4)). La mediana de OMAX disminuyó de 177 m^3/s a 170 m^3/s con K que varía de uno (VEM) a tres, pero aumentó para valores de K superiores a tres, hasta 180 m^3/s para K = 50 (Figura 6 (b4)).

Para los valores de Tr dentro del rango de 100 a 500 años, todos los eventos se ubicaron en QIII para valores de K que van de uno a diez (Figura 7 (a5)) y más del 93% para valores de K superiores a diez (Figura 6 (a5, b5)). Los valores medios de ZMAX y OMAX disminuyeron de 510.0 m y 270 m^3/s para K = 1 (VEM), a 509.6 m y 252 m^3/s para K = 10, respectivamente. Para valores K superiores a diez, los valores medios de ZMAX y OMAX permanecieron casi constantes. Para valores de Tr superiores a 500 años, independientemente del valor K (excepto aquellos inferiores a uno), todos los eventos se ubicaron en QIII (Figura 7 (a6)). Los valores medios de ZMAX y OMAX oscilaron entre 511.0 m y 375 m^3/s para K = 1 (VEM), a 510.8 m y 360 m^3/s para K = 10, respectivamente (Figura 6 (a6, b6)). Para valores K superiores a diez, los valores medios de ZMAX y OMAX permanecieron casi constantes. I-O y MILP también se compararon con VEM. Como se esperaba, el comportamiento de I-O fue similar al Método K para valores K más altos (Figura 7).

Al comparar MILP y VEM, los resultados mostraron que todos los eventos con un Tr superior a 25 años se ubicaron en QIII, y aquellos con un Tr inferior a 25 años ubicados en QII presentaron salidas que no pusieron en peligro la seguridad aguas abajo (Figura 7).

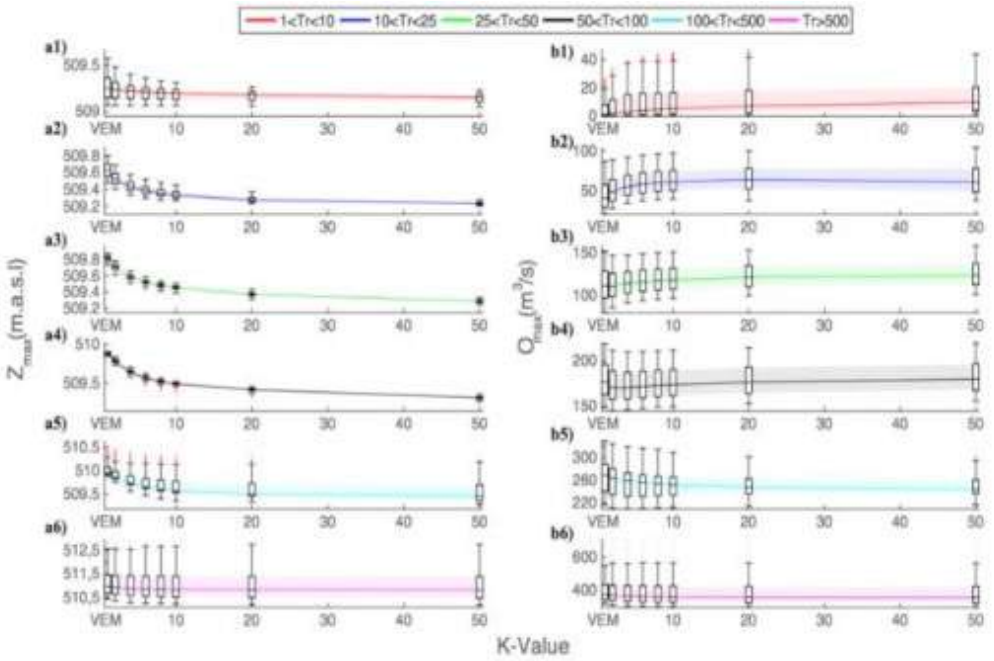


Figura 6. Comparación del K-Method (para diferentes valores de K) con respecto al VEM (K=1). La línea continua muestra la mediana y el área sombreada el rango entre el percentil 25 y 75 de los niveles máximos embalsados (ZMAX) (a) y máximos caudales vertidos (OMAX) (b), desde K = 1 a 50. El eje horizontal muestra los diferentes valores de K. Los colores representan los diferentes períodos de retorno analizados.

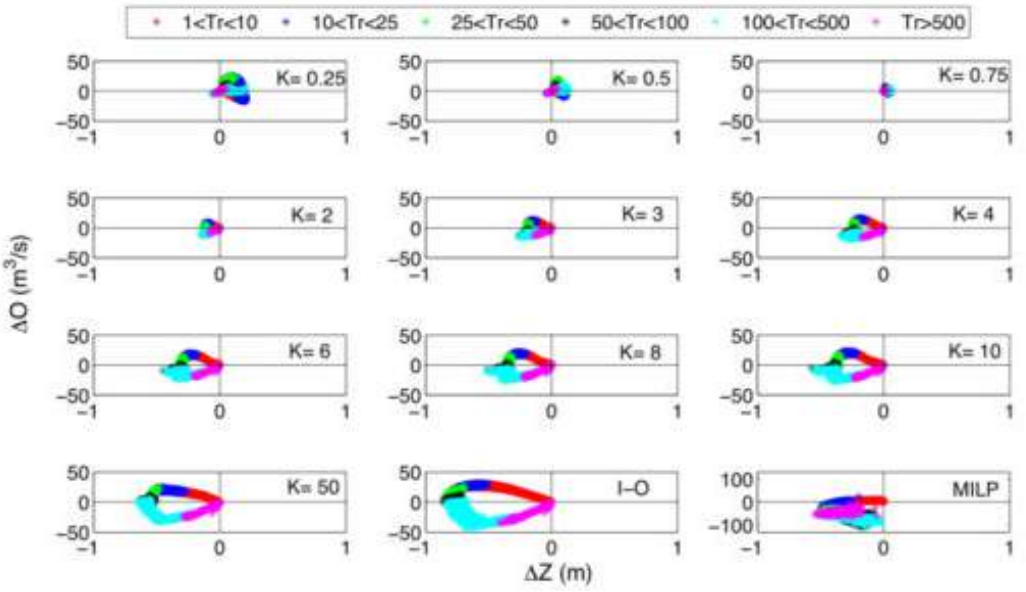


Figura 7. Comparación del K-Method (para diferentes valores de K), I-O y MILP respecto a VEM (K=1). El eje horizontal muestra el incremento del nivel máximo en el embalse en m (ΔZ). El eje vertical muestra el incremento del máximo caudal vertido en m^3/s (ΔO). Los colores representan los diferentes períodos de retorno analizados. Fuente: tesis doctoral de Iván Gabriel-Martín.

El Método K propuesto es una herramienta para la toma de decisiones para los administradores de presas que permite analizar los efectos de aplicar diferentes reglas de operación de embalses tanto para la seguridad de la presa como para la seguridad aguas abajo. En contraste con otros métodos

fijos, el Método K permite, para cada presa analizada, la identificación del valor K que mejor adapte la estrategia de manejo a las condiciones específicas de la cuenca, el embalse, el vertedero y a los objetivos de la gestión de inundaciones. Cabe señalar que el método propuesto se ha aplicado a una sola configuración de cuenca y presa, que limita la generalización de los resultados y conclusiones obtenidas. Aunque los resultados son prometedores, se deben desarrollar más investigaciones para garantizar que el método K mejore el funcionamiento de las reglas de control de inundaciones a través de una amplia gama de presas con aliviaderos con compuertas.

Para el estudio de caso bajo análisis, el Método K mejoró los resultados obtenidos con VEM, al reducir los niveles máximos de embalse alcanzados en la presa (cuanto mayor es el valor K, menor es el nivel máximo de embalse), mientras que el aumento correspondiente de los caudales de salida no puso en peligro la seguridad aguas abajo. Además, al realizar un análisis de riesgo de represas (no mostrado en este estudio), un valor K de 5.25 redujo el índice de riesgo global, IR, en 8.4% en comparación con VEM, y representó 17.3% de la reducción máxima posible determinada por MILP.

Se identificaron diferentes comportamientos, dependiendo de los Trs analizados. Para eventos con un Tr que varía de uno a 25 años, el valor K = 10 resultó en una disminución importante en los niveles máximos del embalse, mientras que el aumento correspondiente de los caudales de salida no puso en peligro la seguridad aguas abajo.

Para eventos con un Tr que varía de 25 a 100 años, los valores K más altos redujeron el número de eventos que simultáneamente alcanzaron niveles máximos y salidas más bajas. Para eventos con un Tr superior a 500 años, I-O alcanzó simultáneamente los niveles máximos y caudales de salida más bajos. En un caso práctico, incluso si la habilidad requerida para pronosticar el hidrograma de entrada es limitada, de acuerdo con la situación meteorológica general, el administrador de la presa puede estimar el período de retorno del evento que está ocurriendo y, por lo tanto, las conclusiones obtenidas podrían aplicarse. para decidir sobre el mejor valor K a ser considerado.

2.3. Definición del volumen máximo de resguardo en embalses

Los niveles máximos de conservación (MCL) representan la variable de enlace entre la operación de control de inundaciones y la operación de conservación de agua del embalse (Figura 8). Para obtener el conjunto óptimo de MCL estacionales que representan tanto la seguridad hidrológica (presa y aguas abajo) como el suministro de agua con una garantía específica, se propone una metodología estocástica, resumida gráficamente en la Figura 8.

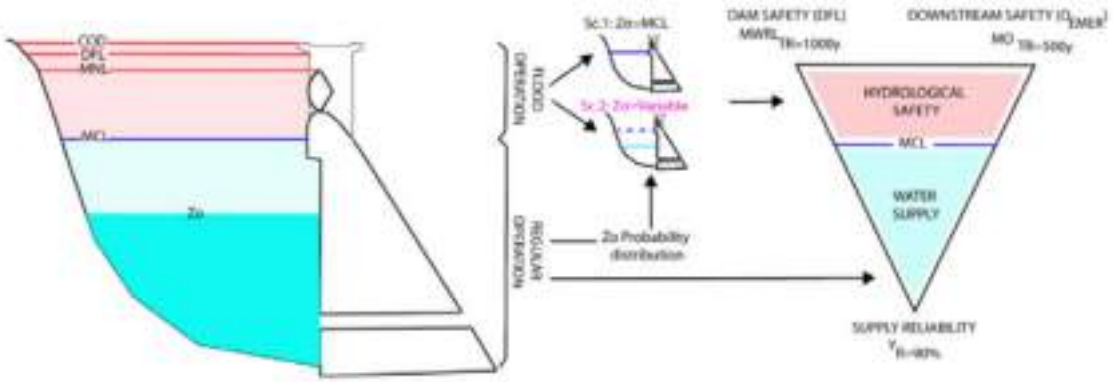


Figura 8. Esquema general de la metodología propuesta.

El número de configuraciones posibles de MCL varía de acuerdo con el número de estaciones (n) definidas en un año y los posibles niveles máximos de conservación seleccionados para una discretización adecuada para analizar todos los resultados en el tiempo de cálculo (k). Como la posición de los MCL es importante (no es lo mismo tener el mismo MCL en una temporada u otra), el número de configuraciones se dio por una variación con repetición ($VR_k^n = k^n$). Para cada configuración de MCL estacionales del estudio, se llevaron a cabo dos simulaciones diferentes de operación de embalses: simulación de operación de control de inundaciones y simulación de operación de conservación de agua en situación normal.

Para cada configuración de MCL, se obtuvo el nivel máximo de agua en el embalse correspondiente a un período de retorno de 1,000 años (MWRL TR = 1000y) y el caudal máximo de salida correspondiente a un período de retorno de 500 años (MO TR = 500y), correspondiente a un conjunto de 100,000 hidrogramas de entrada anuales estacionales máximos y transitados aplicando el VEM. El análisis se llevó a cabo en dos escenarios diferentes del nivel inicial del embalse antes del evento de inundación (Zo):

• Escenario 1 (Sc.1): Zo es constante y corresponde al MCL estacional. Se supone que el embalse está en su nivel operativo máximo cuando el embalse recibe la inundación anual máxima.

• Escenario (Sc.2): Zo es variable, y el embalse puede estar en cualquier nivel cuando ocurre la inundación máxima anual. Zo se obtiene (dentro de un entorno de Monte Carlo) a partir de la distribución de probabilidad acumulada de Zo asociada a la temporada de ocurrencia del evento anual máximo de avenida. Esta distribución se obtiene de la simulación de la operación de conservación de agua del embalse histórica observada.

La garantía de suministro (YR) se consideró como la relación del volumen total suministrado y el volumen total demandado (Chavez-Jimenez et al., 2013; Sordo-Ward et al., 2019a, b) durante el período analizado. Para cada configuración de MCL (k), se obtiene el comportamiento del embalse para una garantía del 90% (YR = 90%) y la distribución de probabilidad acumulada de valores de Zo, mediante el desarrollo de un modelo de balance hídrico mensual. El modelo gestiona la presa como un elemento aislado. El balance hídrico considera series temporales de entradas mensuales, restricciones de flujo ecológico, tasas de evaporación, distribución de demanda mensual, curvas de embalse y volumen de almacenamiento muerto (datos extraídos del "Plan Maestro Nacional de Agua Duero" (CHD, 2015). El objetivo principal del embalse es el riego y, por lo tanto, se adoptó una garantía requerida del 90% (YR = 90%), adecuada para las demandas de riego en la región (Garrote et al., 2015).

Para identificar la cantidad máxima de agua que se puede suministrar para satisfacer una demanda regular con una confiabilidad especificada, se aplicó un método de bipartición: se establecieron valores excesivos de demandas (por ejemplo, similares a la escorrentía mensual promedio) y se realizó la simulación. Se obtuvieron los déficits y se verificaron los requisitos de garantía especificados. Si no se cumplieron los requisitos de garantía especificados, la demanda se redujo a la mitad y se volvió a simular. Si se satisfacían los requisitos de confiabilidad especificados, la mitad de la diferencia se agregaba y simulaba nuevamente, y así hasta que el déficit (o ganancia) fuera menor que una tolerancia preestablecida (por ejemplo, 0.1 hm^3/año). Además, la operación del embalse se simuló con la demanda actual anual promedio asociada. El procedimiento se repitió para los escenarios Sc.1 y Sc.2.

El método, por tanto, combina tres aspectos innovadores:

1. Evaluación estocástica de la seguridad hidrológica de la presa y la seguridad del río aguas abajo a través de períodos de retorno relacionados con los niveles máximos de los embalses y los caudales máximos vertidos.
2. Determinación de MCL que aumentan/mantienen la garantía de suministro del agua para una garantía específica mientras mantienen/mejoran la seguridad de la presa hidrológica.
3. Determinación de los MCL que representan la variabilidad del nivel inicial del embalse antes de las inundaciones.

La metodología se aplica a la presa Riaño, una presa con aliviadero con compuertas ubicada en la cuenca del río Duero, España, pero se puede aplicar a cualquier embalse independientemente de su ubicación o tipología del aliviadero. Los análisis de daños por inundación resumidos en el Plan Maestro de Presas concluyeron que las descargas superiores a 700 m^3/s crean una condición de emergencia de inundación aguas abajo. Este valor (OEMER) fue adoptado para identificar daños catastróficos por inundación. Se utilizaron los siguientes datos para realizar el estudio:

- Simulación de la operación de control de inundaciones. Además de las estructuras de control de inundaciones y la configuración de presa, se utilizó una estación de aforos ubicada aguas abajo del embalse de Riaño con 30 años de datos de caudales diarios. Con esta serie de tiempo, se generaron 100,000 hidrogramas sintéticos de inundación estacionales.

- Simulación de operación regular. Se utilizó una serie temporal mensual de aportaciones al embalse desde 1940 hasta 2013, restricciones de caudales ecológicos, tasas de evaporación, distribución de demanda mensual, curvas de embalse y volumen de almacenamiento muerto, todos los datos obtenidos del Plan de gestión de la cuenca del río Duero (CHD, 2015). Se contabilizó una demanda media anual de 545 hm^3.

Se estudió un conjunto de MCL que comprendía desde 651 hm^3 (volumen en MNL) hasta 400 hm^3. En aras de la simplicidad, se estimó el volumen del hidrograma de inundación de Tr = 5,000 años (247 hm^3), y se definió un volumen de control de inundación máximo de 251 hm^3. Los intervalos de la diferencia entre el volumen en el embalse en MNL y los diferentes MCL se discretizaron en intervalos de 5 hm^3. Por lo tanto, se definió un conjunto de k = 51 posibles MCL por temporada (asociado a un volumen en el embalse de 651, 645, 640, ..., 405, 400 hm^3).

Se definieron tres estaciones (no presentado en este estudio) con respecto a las inundaciones anuales máximas en Riaño: la temporada 1 desde principios de noviembre hasta finales de enero, la temporada 2 desde principios de febrero hasta finales de abril y la temporada 3 desde el principio de mayo a finales de octubre.

Por lo tanto, como n = 3 temporadas, se analizó un conjunto de 51^3 = 132,651 configuraciones de MCL por escenario. Se consideró un conjunto de 100,000 hidrogramas de avenidas sintéticas anuales representativas de los 30 años de eventos observados (1954–1984). Las distribuciones marginales de los caudales máximos sintéticos y los volúmenes del hidrograma (100,000 cada uno) se analizaron utilizando la fórmula no paramétrica de Gringorten (Gringorten, 1963).

Para cada configuración de MCL, se obtuvieron los valores de MWRL TR = 1000y, MO TR = 500y simulando la operación de avenidas del embalse para Sc.1 y Sc.2. Al simular la operación regular del embalse, se obtuvo YR = 90%.

Para proponer soluciones se realizaron las siguientes fases. Primero, se identificaron las configuraciones que no cumplían la seguridad hidrológica de la presa (MWRL TR = 1000y > DFL)

y/o la seguridad aguas abajo (MO TR = 500y > OEMER) en ambos escenarios. Un total de 826 configuraciones (0.6% de 132,651 configuraciones) tenían un valor de MWRL TR = 1000y mayor que DFL en Sc.1. (puntos rojos en la Figura 9a), mientras que ninguna de las configuraciones tenía valores MWRL TR = 1000y más altos que el DFL en Sc.2 (Figura 9c). Cabe señalar que, en Sc.1 las 826 configuraciones que no cumplían con la seguridad hidrológica de la presa tampoco cumplían con la condición de seguridad aguas abajo. Por otro lado, 59,013 configuraciones (44.5% del número total de configuraciones) tenían un valor de MO TR = 500y más alto que OEMER en Sc.1, mientras que 4,944 (3.7%) en Sc.2. La Figura 9a y la Figura 9c muestran el par de valores YR = 90% y MO TR = 500y (puntos grises) para cada configuración analizada en Sc.1 y Sc.2 respectivamente.

En Sc.1, las soluciones de Pareto consistieron en 277 configuraciones (Figura 9a, puntos magenta), siendo 98 las configuraciones que satisfacen: YR = 90% ≥ Da, MO TR = 500y ≤ OEMER. y MWRL TR = 1000y ≤ DFL (soluciones propuestas, cian en la Figura 9a).

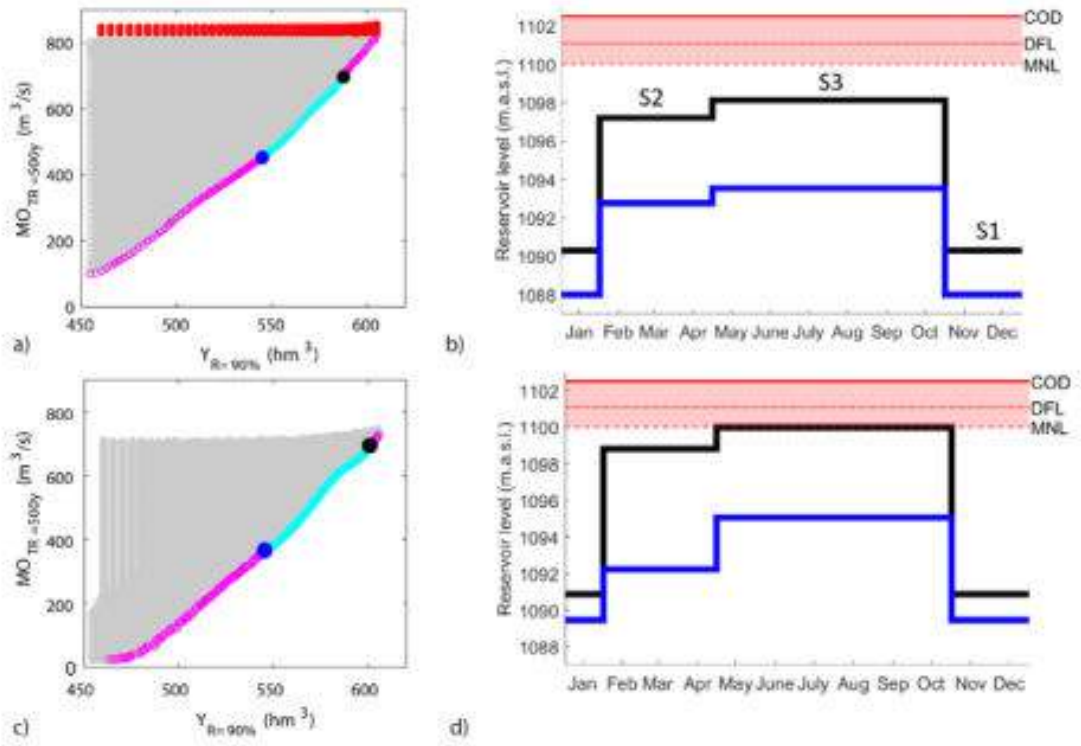


Figura 9. (a, c) Representación en gris del par de valores YR = 90% y MO TR = 500y para el escenario 1 y el escenario 2 respectivamente. Los puntos rojos representan el par de valores que no cumplen los requisitos de nivel (MWRL TR = 1000y > DFL). El frente de Pareto se representa con puntos magenta, mientras que las soluciones propuestas se representan en cian. El punto negro representa la solución que maximiza la demanda y cumple con el requisito de caudal máximo de vertido (MO TR = 500y = OEMER). El punto azul representa la solución en la cual YR = 90% es igual a la demanda anual actual, minimizando el caudal máximo vertido (b, d). MCL para cada mes/temporada que corresponde a las soluciones propuestas previamente seleccionadas (puntos azul y negro), para S1 y S2 respectivamente.

En Sc.2, para el mismo análisis, se obtuvieron 247 configuraciones (puntos magenta en la Figura 9c) y 135 (puntos cian en la Figura 9c) respectivamente. Para ambos escenarios, se identificaron las soluciones extremas propuestas. Por un lado, en el caso de MO TR = 500y = OEMER = 700 m^3/s (Figura 9a y Figura 9c, punto negro), YR = 90% = 587 hm^3 (para Sc.1) y 600 hm^3 (para Sc.2) representa una mejora (en comparación con Da) de 7.7% y 10.1% respectivamente. Por otro lado, en

el caso de YR = 90% = Da = 545 hm^3 (Figura 9a y Figura 9c, punto azul oscuro), MO TR = 500y = 452 m^3/s (para Sc.1) y 366 m^3/s (para Sc.2) que representa un 64.2% y 52.3% de OEMER, respectivamente. Es importante señalar que, en el caso de utilizar un procedimiento determinista centrado en la seguridad hidrológica de la presa y la seguridad aguas abajo (procedimiento convencional), cualquier configuración estudiada de MCL podría ser una solución potencial (puntos grises dentro de la Figura 9a y la Figura 9c). Por lo tanto, si MO TR = 500y = OEMER, el procedimiento estocástico propuesto presentó mejoras de hasta 146 hm^3 (26.8% de Da) en comparación con la peor configuración de operación regular (YR = 90% = 454 hm^3 en Sc.1; (Figura 9a)) Las configuraciones correspondientes de MCL para las soluciones extremas propuestas se representan en la Figura 9b (Sc.1) y la Figura 9d (Sc.2) con el mismo esquema de color que en la Figura 9a y la Figura 9c respectivamente. En ambos escenarios, los MCL más altos se asociaron a S3, mientras que los más bajos a S1.

Las principales conclusiones extraídas de este estudio son las siguientes:

- El uso de una metodología estocástica permitió evaluar la seguridad hidrológica de una presa y la seguridad aguas abajo al obtener las curvas de frecuencia de los niveles máximos en el embalse y caudales máximos vertidos, mientras se tiene en cuenta la variabilidad en las solicitaciones hidrológicas con respecto a los procedimientos deterministas. Como inconveniente, implica un procedimiento más complejo y un esfuerzo computacional importante.
- Considerando que el nivel inicial del embalse es igual al Nivel Máximo de Conservación para cada temporada, se propone un conjunto de 98 soluciones no inferiores y 135 configuraciones posibles considerando el nivel inicial variable del reservorio. A partir de las configuraciones propuestas, los operadores de la presa pueden decidir qué configuración usar según sus preferencias: aumentar la seguridad hidrológica de la presa y aguas abajo o aumentar la garantía de suministro de agua en el sistema de recursos hídricos. En el estudio de caso de Riaño, el procedimiento presentado mostró mejoras en la operación regular que implican un aumento equivalente a poder atender hasta el 10.1% de la demanda anual actual de 545 hm^3 (con una confiabilidad del 90%) mientras se mantiene la misma seguridad hidrológica de la presa.
- El tener en cuenta la variabilidad inicial del embalse (previo a un evento) dio como resultado la posibilidad de abastecer una demanda adicional de 13 hm^3 (2.4% de la demanda anual actual) en comparación con la solución óptima sin tener en cuenta la variabilidad inicial del nivel del embalse.
- El procedimiento estocástico propuesto puede mejorar los resultados obtenidos mediante procedimientos deterministas, aumentando el suministro hasta un 26.8% de la demanda anual actual, desde la peor configuración de operación regular (y sin tener en cuenta la variabilidad inicial del nivel del embalse) hasta la configuración óptima (teniendo en cuenta el nivel inicial del embalse variable) de los niveles máximos de conservación.

REFERENCIAS

- Ahmed, E. M. S. y Mays, L. W. (2013). Model for determining real-time optimal dam releases during flooding conditions. *Nat. Hazards*, 65, 1849-1861.
- Alfieri, L., Laio, F. y Claps, P. (2008). A simulation experiment for optimal design hyetograph selection. *Hydrol. Process*., 22(6), 813-820. https://doi.org/10.1002/hyp.6646
- Andreu, J., Capilla, J. y Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3-4), 269-291. https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X
- Aranda Domingo, J. A. (2014). *Estimación de la probabilidad de sobrevertido y caudales máximos aguas abajo de presas de embalse. Efecto del grado de llenado inicial*. Dissertation, Technical University of Valencia. https://doi.org/10.4995/thesis/10251/36537
- Arnaud, P. y Lavabre, J. (2002). Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resour. Res*., 38(6). https://doi.org/10.1029/2001wr000474
- Arnell, N. W. (1989). Expected annual damages and uncertainties in flood frequency estimation. *J. Water Resour. Plan. Manag*., 115, 94-107.
- Arnone, E., Pumo, D., Francipane, A., La Loggia, G. y Noto, L. V. (2018). The role of urban growth, climate change, and their interplay in altering runoff extremes. *Hydrol. Process.*, 32, 1755-1770.
- Aronica, G. y Candela, A. (2007). Derivation of flood frequency curves in poorly gauged Mediterranean catchments using a simple stochastic hydrological rainfall-runoff model. *J. Hydrol*., 347, 132-142.
- Berga, L. (2006). *Dams in Spain*. Spanish Professional Assoc. of Civ. Eng.
- Bianucci, P., Sordo-Ward, A., Moralo, J. y Garrote, L. (2015). Probabilistic-Multiobjective Comparison of User-Defined Operating Rules. Case Study: Hydropower Dam in Spain. *Water*, 7, 956-974. https://doi.org/10.3390/w7030956
- Bianucci, P., Sordo-Ward, A., Perez, J. I., Garcia-Palacios, J., Mediero, L. y Garrote, L. (2013). Risk-based methodology for parameter calibration of a reservoir flood control model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 13(4), 965-981. https://doi.org/10.5194/nhess-13-965-2013
- Blazkova, S. y Beven, K. (2004). Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *J. Hydrol*., 292, 153-172.
- Bocchiola, D. y Rosso, R. (2014). Safety of Italian dams in the face of flood hazard. *Adv. Water Resour.* 71, 23-31. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.05.006
- Carvajal, C., Peyras, L., Arnaud, P., Boissier, D. y Royet, P. (2009). Probabilistic Modeling of Floodwater Level for Dam Reservoirs. *J. Hydrol. Eng*., 14(3), 223-232. https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2009)14:3(223)
- Castillo-Rodriguez, J. T., Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I. (2015). *A risk-informed journey towards improved dam safety governance in Spain*. Second International Dam World Conference, Lisbon.
- Chang, L. C., Chang, F. J. y Hsu, H. C. (2010). Real-time reservoir operation for flood control using artificial intelligent techniques. *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul*., 11, 887-902.
- Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A. y Mediero, L. (2013). Characterisation of the sensitivity of water resources systems to climate change. *Water Resources Management,* 27, 4237-4258. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0404-2
- Cheng, C. T. y Chau, K. W. (2001). Fuzzy iteration methodology for reservoir flood control operation. *J. Am. Water Resour. Assoc*., 37, 1381-1388.
- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Mc Graw Hill, New York.
- Confederación Hidrográfica del Duero, CHD (2015). *Plan hidrológico de la parte española de la D.H.Duero (2015–2021)*. Official Report of the Ministry of Agriculture, Food and Environment

of Spain, Valladolid, Spain.
- Cowpertwait, P. S. P. (2004). Mixed rectangular pulses models of rainfall. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8, 993-1000.
- Cuevas Velasquez, V. (2015). *Modelo de Gestión de un Embalse en Tiempo Real Durante Avenidas Basado en Redes Bayesianas Entrenadas con el Método de Optimización PLEM*. Ph.D. Thesis, Technical University of Madrid, Madrid, Spain.
- De Andrés Rodríguez-Trelles, M. y Mazaira, J. P. (2013). Presas. Seguridad y percepción del riesgo. *Ingeniería y territorio*, 62, 22-27.
- De Michele, C. y Salvadori, G. (2002). On the derived flood frequency distribution: analytical formulation and the influence of antecedent soil moisture condition. *J. Hydrol*. 262, 245-258.
- Eagleson, P. S. (1972). Dynamics of flood frequency. *Water Resour. Res.*, 8(4), 878-&. https://doi.org/10.1029/WR008i004p00878
- Escuder-Bueno, I. y González-Pérez, J. (2014). *Metodología para la evaluación del riesgo hidrológico de presas y priorización de medidas correctoras*. Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Etoh, T., Murota, A. y Nakanishi, M. (1987). SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum. En: V. P. Shing (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses* (Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA, 14–17 May 1986), 253–264. Reidel Publishing Company, Boston, MA, USA.
- Fatichi, S., Ivanov, V.Y., Caporali, E. (2011). Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Adv. Water Resour*., 34(4), 448-467.
- Flores-Montoya, I., Sordo-Ward, A., Mediero, L. y Garrote, L. (2016). Fully Stochastic Distributed Methodology for Multivariate Flood Frequency Analysis. *Water*, 8(6). https://doi.org/10.3390/w8060225
- Fluixá-Sanmartín, J., Altarejos-García, L., Morales-Torres, A. y Escuder-Bueno, I. (2018). Review article: Climate change impacts on dam safety. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 18, 2471-2488. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2471-2018
- Garrote, L. y Brass, R. L. (1995). An integrated software environment for real-time use of a distributed hydrologic model. *J. Hydrol*., 167, 307-326.
- Garrote, L., Iglesias, A., Granados, A., Mediero, L. y Martin-Carrasco, F. (2015). Quantitative assessment of climate change vulnerability of irrigation demands in Mediterranean Europe. *Water Resources Management,* 29, 325-338. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0736-6
- Girón, F. (1988). The evacuation of floods during the operation of reservoirs. En: *Transactions Sixteenth International Congress on Large Dams*, Report 75, Volume 4, 1261-1283. ICOLD, San Francisco, CA, USA.
- Gringorten, I. I. (1963). A plotting rule for extreme probability paper. *J. Geophys. Res*., 68(3), 813-814. https://doi.org/10.1029/JZ068i003p00813
- Haberlandt, U., Ebner von Eschenbach, A. D. y Buchwald, I. (2008). A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 12, 1353-1367.
- International Commission on Large Dams, ICOLD (1994). *Technical Dictionary on Dams: A Glossary of Words and Phrases Related to Dams*. ICOLD, Paris, France.
- International Commission on Large Dams, ICOLD (2018). *Flood Evaluation and Dam Safety*. CRC Press, London.
- Ishak, W. W., Ku-Mahamud, K.-R. & Norwawi, N. M. (2011). Mining temporal reservoir data using sliding window technique. *CiiT Int. J. Data Min. Knowl. Eng*., 3, 473-478.
- Ivanov, V. Y., Vivoni, E. R., Bras, R. L. y Entekhabi, D. (2004a). Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. *Water Resour. Res.,* 40, W11102.
- Ivanov, V. Y., Bras, R. L. y Curtis, D. C. (2007). A weather generator for hydrological, ecological, and agricultural applications. *Water Resour. Res*., 43, 40.
- Jimenez-Alvarez, A., Garcia-Montañes, C., Mediero, L., Inicio, L. y Garrote, J. (2012). Map of

maximum flows of intercommunity basins in Spain. *Revista de Obras Públicas*, 3533, 7-32.
- Katz, R. W., Parlange, M. B. y Naveau, P. (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Adv. Water Resour*., 25, 1287-1304. https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8
- Klein, B., Pahlow, M., Hundecha, Y. y Schumann, A. (2010). Probability Analysis of Hydrological Loads for the Design of Flood Control Systems Using Copulas. *Journal of Hydrologic Engineering,* 15(5). https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000204
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J. y Bobee, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *J. Hydrol*., 225, 103-117. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00167-5
- Le Ngo, L., Madsen, H. y Rosbjerg, D. (2007). Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir, Vietnam. *J. Hydrol*., 336, 269-281.
- Li, Y., Guo, S., Quo, J., Wang, Y., Li, T. y Chen, J. (2014). Deriving the optimal refill rule for multi-purpose reservoir considering flood control risk. *J. Hydro-Environ. Res*., 8, 248-259.
- Liu, P., Lin, K. R. y Wei, X. J. (2015). A two-stage method of quantitative flood risk analysis for reservoir real-time operation using ensemble-based hydrologic forecasts. Stoch. Environ. *Res. Risk Assess.,* 29, 803-813.
- Loucks, D. y Sigvaldason, O. (1982). Multiple-reservoir operation in North America. In: Z. Kaczmarek y J. Kindler (Eds.), *The Operation of Multiple Reservoir System*. International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Austria.
- Loukas, A. (2002). Flood frequency estimation by a derived distribution procedure. *J. Hydrol.*, 255(1-4), 69-89. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(01)00505-4
- McCarthy (1939). The Unit Hydrograph and Flood Routing. In: *Proceedings of the Conference of the North Atlantic Division USACE* (New London, CT, USA, 24 June 1938). North Atlantic Division USACE, New London, CT, USA.
- Mediero, L., Jiménez-Álvarez, A. y Garrote, L. (2010). Design flood hydrographs from the relationship between flood peak and volume. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 2495-2505.
- Michailidi, E. M. y Bacchi, B. (2017). Dealing with uncertainty in the probability of overtopping of a flood mitigation dam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2497. https://doi.org/10.5194/hess-21-2497-2017.
- Micovic, Z., Hartford, D. N. D., Schaefer, M. G. y Barker, B. L. (2016). A non-traditional approach to the analysis of flood hazard for dams. *Stochastic Environmental Research Risk Assessment,* 30(2), 559-581. https://doi.org/10.1007/s00477-015-1052-2
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA (2019). *SCNZI-Inventario de Presas y Embalses*. https://sig.mapama.gob.es/snczi/
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I, A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10(3), 282-290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Needham, J. T., Watkins, D. W., Lund, J. R. y Nanda, S. K. (2000). Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers. *J. Water Resour. Plan. Manag*., 126, 118-127.
- Nelder, J. y Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Comput. J*., 7, 308-313.
- Oliveira, R. y Loucks, D. (1997). Operating rules for multireservoir systems. *Water Resour. Res*., 33, 839-852.
- Ouarda, T. B. M. J., Cunderlik, J. M., St-Hilaire, A., Barbet, M., Brunear, P. y Bobée, B. (2006). Data-based comparison of seasonality-based regional flood frequency methods. *J. Hydrol*., 330 (1-2), 329-339. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.023
- Paquet, E., Garavaglia, F., Garcon, R. y Gailhard, J. (2013). The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *J. Hydrol*., 495, 23-37. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.045
- Peyras, L., Carvajal, C., Felix, H., Bacconnet, C., Royet, P., Becue, J. P. y Boissier, D. (2012).

Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods–application to hazards studies. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 16(7), 795-817.

- Piras, M., Mascaro, G., Deidda, R., Vivoni, E. R. (2014). Quantification of hydrologic impacts of climate change in a Mediterranean basin in Sardinia, Italy, through highresolution simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci*., 18, 5201-5217. https://doi.org/10.5194/hess-18-5201-2014
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology. Principles and Practices*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Rahman A., Weinmann P. E., Hoang T. M. T. y Laurenson E. M. (2002). Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall. *J. Hydrol*. 256, 196-210.
- Requena, A. I., Flores, I., Mediero, L. y Garrote, L. (2016). Extension of observed flood series by combining a distributed hydro-meteorological model and a copula-based model. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess*., 30(5), 1363-1378. https://doi.org/10.1007/s00477-015-1138-x
- Restrepo-Posada, P. J. y Eagleson, P. S. (1982). Identification of independent rainstorms. *J. Hydrol*. 55, 303-319.
- Salvadori, G. y De Michele, C. (2010). Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: A copula approach. *Water Resour. Res*., 46, W10501, https://doi.org/10.1029/2009WR009040
- San Mauro, J., Salazar, F., Toledo, M., Caballero, F., Ponce-Farfán, C. y Ramos, T. (2016). Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico. Ingeniería del agua, 20(3), 127-138. https://doi.org/10.4995/ia.2016.4614
- Serrano-Lombillo, A., Escuder-Bueno, I., Membrillera-Ortuño, M. G. y Altarejos-García, L. (2010). Methodology for the Calculation of Annualized Incremental Risks in Systems of Dams. *Risk Anal*. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01547.x
- Serrano-Lombillo, A., Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I. y Altarejos-García, L. (2016). A new risk reduction indicator for dam safety management combining efficiency and equity principles. *Struct. Infrastruct. Eng*., 1-10. https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1245762
- Solera-Solera, A., Morales-Torres, A. y Serrano-Lombillo, A. (2011). Cost estimation of freeboard requirements in water resources management. In: *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management,* 9-14. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11588-4
- Sordo-Ward, A., Bianucci, P., Garrote, L. y Granados, A. (2014). How Safe is Hydrologic Infrastructure Design? Analysis of Factors Affecting Extreme Flood Estimation. *J. Hydrol. Eng*., 19(12). https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000981
- Sordo-Ward, A., Bianucci, P., Garrote, L. y Granados, A. (2016). The Influence of the Annual Number of Storms on the Derivation of the Flood Frequency Curve through Event-Based Simulation. *Water*, 8, 335.
- Sordo-Ward, A., Garrote, L., Bejarano, M. D. y Castillo, L. G. (2013). Extreme flood abatement in large dams with gate-controlled spillways. *J. Hydrol*., 498, 113-123. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.010
- Sordo-Ward, A., Garrote, L., Martin-Carrasco, F. y Bejarano, M. D. (2012). Extreme flood abatement in large dams with fixed-crest spillways. *J. Hydrol*., 466, 60-72. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.009
- Sordo-Ward, A., Granados, A., Iglesias, A., Garrote, L. y Bejarano, M.D. (2019a). Adaptation Effort and Performance of Water Management Strategies to Face Climate Change Impacts in Six Representative Basins of Southern Europe. *Water*, 11, 1078. https://doi.org/10.3390/w11051078
- Sordo-Ward, A., Granados, I., Iglesias, A. y Garrote, L. (2019b). Blue Water in Europe: Estimates of Current and Future Availability and Analysis of Uncertainty. *Water,* 11, 420. https://doi.org/10.3390/w11030420
- Spanish National Committe on Large Dams, SPANCOLD (2012). *Risk Analysis as Applied to*

Dam Safety, Technical Guide on Operation of Dams and Reservoirs. Professional Association of Civil Engineers, Madrid. http://www.spancold.es/Archivos/Monograph_Risk_Analysis.pdf

- Spanish National Committee on Large Dams, SPANCOLD (1997). *Avenida de proyecto. Technical Guides on Dam safety*, vol. 4. Madrid.
- United States Army Corps of Engineers, USACE (1976). *Flood Control by Reservoirs. International Hydrological Decade*, vol. 7.
- United States Army Corps of Engineers, USACE (1991). *Inflow design floods for Dams and Reservoirs*. ER 1110-8-2(FR). USACE, USA.
- United States Army Corps of Engineers, USACE (2011). *Safety of dams – Policy and procedures*. Tech. Rep. ER 1110-2- 1156. Washington, DC.
- United States Department of Agriculture, USDA (1972). Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. USDA, Washington, DC, USA.
- United States Geological Survey, USGS (1982). *Guidelines for determining Flood Flow Frequency*. Bulletin Nº17B of the Hydrology Subcommittee. USGS, USA.
- United States Water Resources Council, USWRC (1976). *Guidelines for determining flood flow frequency*. Bulletin 17 of the Hydrology Subcommittee. Washington DC, USA.
- Viglione, A. y Bloschl, G. (2009). On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrol. Earth. Syst. Sci*., 13(2), 205-216.
- Vivoni, E. R., Mascaro, G., Mniszewski, S., Fasel, P., Springer, E. P., Ivanov, V. Y. y Bras, R. L. (2011). Real-world hydrologic assessment of a fully-distributed hydrological model in a parallel computing environment. *J. Hydrol*., 409, 483-496, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.053
- Wang, L., Nyunt, C. T., Koike, T., Saavedra, O., Nguyen, L. C. y Van Sapt, T. (2010). Development of an integrated modelling system for improved multi-objective reservoir operation. *Front. Archit. Civ. Eng. China*, 4, 47-55.
- Wurbs, R. (2005). *Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models*. Texas Water Resources Institute, College Station, TX, USA.
- Xie, A., Liu, P., Guo, S., Zhang, X., Jiang, H. y Yang, G. (2018). Optimal Design of Seasonal Flood Limited Water Levels by Jointing Operation of the Reservoir and Floodplains. *Water Resour. Manag.* 32(1), 179-193. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1802-7
- Zhang, L. y Singh, V.P. (2017). Trivariate flood frequency analysis using the Gumbel–Hougaard copula. *J. Hydrol. Eng*., 12, 431-439.
- Zhao, T. T. G., Cai, X. M. y Yang, D. W. (2011). Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Adv. Water Res*., 34, 495-504.
- Zhou, Y. y Guo, S. (2014). Risk analysis for flood control operation of seasonal flood-limited water level incorporating inflow forecasting error. *Hydrol. Sci. J*., 59(5), 1006-1019. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1802-7

CONSIDERACIONES SOBRE LA PELIGROSIDAD EN ZONAS URBANAS FRENTE A NUNDACIONES MEDIANTE SIMULACIONES A PARTIR DE MODELOS 2D

José María Carrillo Sánchez
jose.carrillo@upct.es
https://orcid.org/0000-0003-4264-3269

Luis G. Castillo Elsitdié
luis.castillo@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-6859-7232

Juan T. García Bermejo
juan.gbermejo@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-7204-688X

Juan Manuel García-Guerrero
jm.guerrero@upct.es
http://orcid.org/0000-0001-7784-0284

Luis Altarejos García
luis.altarejos@upct.es
https://orcid.org/0000-0002-4427-3698

Francisco Javier Pérez De La Cruz
javier.cruz@upct.es
https://orcid.org/0000-0001-8684-3962

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena, España

RESUMEN

En los últimos años se han producido grandes inundaciones en núcleos urbanos del levante español. El Campo de Cartagena es uno de los casos más notorios en la actualidad, donde conviven una pendiente casi horizontal en la zona media-baja, grandes variaciones del uso del suelo con transformaciones agrícolas y urbanas, y un medio acuático final que ha sufrido un enorme deterioro, el Mar Menor. En este estudio se analiza la situación actual del entorno urbano de Los Alcázares, siendo una de las poblaciones que más inundaciones ha sufrido en los últimos años. En el estudio se han identificado en torno a 400 subcuencas que forman parte del área drenante en el que se encuentra el municipio. Posteriormente, se han realizado modelos bidimensionales para analizar 6 periodos de

retorno en los que se constata la escasa definición en el terreno de los cauces efímeros y que ya tienden a desbordarse para pequeños periodos de retorno. El flujo desbordado tiende a embalsarse aguas arriba de la autopista AP-7, y accede con escasa ordenación al núcleo urbano, generando inundaciones de elevada profundidad en el casco antiguo de la población.

1. MARCO NORMATIVO

Todas las Administraciones cuentan con competencias en gestión y defensa frente a las inundaciones. La Administración Estatal tiene competencias en la gestión del dominio público hidráulico de las cuencas intercomunitarias, en la gestión del dominio público marítimo terrestre, las inundaciones causadas en las zonas de transición y las debidas a la elevación del nivel del mar, y en protección civil. La Administración Autonómica tiene competencias en la gestión del dominio público hidráulico en las cuencas intracomunitarias, en la ordenación del territorio y en protección civil. Por su parte, la Administración Local realiza las labores de planeamiento urbanístico y protección civil.

La Comisión Europea cuenta con la Directiva 2007/60CE de evaluación y gestión de los riesgos de inundación, transpuesta al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. Dicha Directiva de Inundaciones establece la gestión de los riesgos de inundación en ciclos de 6 años de duración.

La implantación de esta Directiva supone una mejora de la coordinación de todas las Administraciones para reducir los daños causados por inundaciones, centrándose fundamentalmente en las zonas con mayor riesgo de inundación, denominadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI). En dichas áreas se establece la obligación de elaborar los mapas de peligrosidad y mapas de riesgo de inundación, y los planes de gestión del riesgo de inundación.

La Directiva 2007/60CE obliga a los Estados miembros a llevar a cabo las siguientes fases:

- FASE I: Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI), donde se identifican las ARPSI.
- FASE II: Mapas de Peligrosidad y Riesgo (MPRI).
- FASE III: Plan de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI).

Como resultado de la EPRI del 2010-2015, en la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) se identificaron 22 ARPSI de origen fluvial. Adicionalmente se identificaron otras zonas inundables con menor riesgo de inundación, pero en las que se consideró conveniente extender la obtención de la cartografía de peligrosidad. De este modo, la Cartografía de Zonas Inundables (ZI) de la Confederación Hidrográfica del Segura abarca unos 1.285 km de tramos de cauces, en los que están incluidos los tramos de las ARPSI. Dicha cartografía está incorporada al Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) (CHS, 2020).

El primer ciclo del Proyecto de Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura corresponde al período 2010-2015, mientras que el segundo ciclo corresponde al periodo 2016-2021. El segundo ciclo fue aprobado por Resolución de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente (BOE núm. 126, de 27 de mayo de 2019).

Los mapas de peligrosidad comprenden la delimitación hidrográfica de la superficie anegada por las aguas para la ocurrencia de avenidas de alta, media (periodo de retorno de mayor o igual a 100 años) y baja probabilidad (período de retorno igual a 500 años), en aplicación del artículo 8.1 del RD 903/2010.

Adicionalmente, el RD9/2008 considera que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

a) Que el calado sea superior a 1 m.
b) Que la velocidad sea superior a 1 m/s.

c) Que el producto de ambas variables sea superior a 0.5 m^2/s.

La Figura 1 muestra que la zona de estudio que desemboca en la población costera de Los Alcázares está catalogada como Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) de origen fluvial en la Demarcación Hidrográfica del Segura (código ES070/0013).

2. OBJETO DEL ESTUDIO HIDRÁULICO

En el presente estudio se realiza la simulación hidrológica e hidráulica, así como la evaluación de la posible afección del caudal de avenida de diferentes periodos de retorno en el entorno del municipio costero de Los Alcázares. Dicho municipio se encuentra situado en una zona de escasa pendiente en la desembocadura al Mar Menor del denominado Campo de Cartagena.



Figura 1. ARPSI ES070/0013. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.

En el área de estudio se produce la entrada de diferentes ramblas, cuyo cauce tiende a desaparecer en la parte media y baja del Campo de Cartagena, lo que dificulta la identificación de los cauces principales. Esta situación se constata en los mapas de zonas inundables publicados por la Confederación Hidrográfica del Segura (Figura 2).

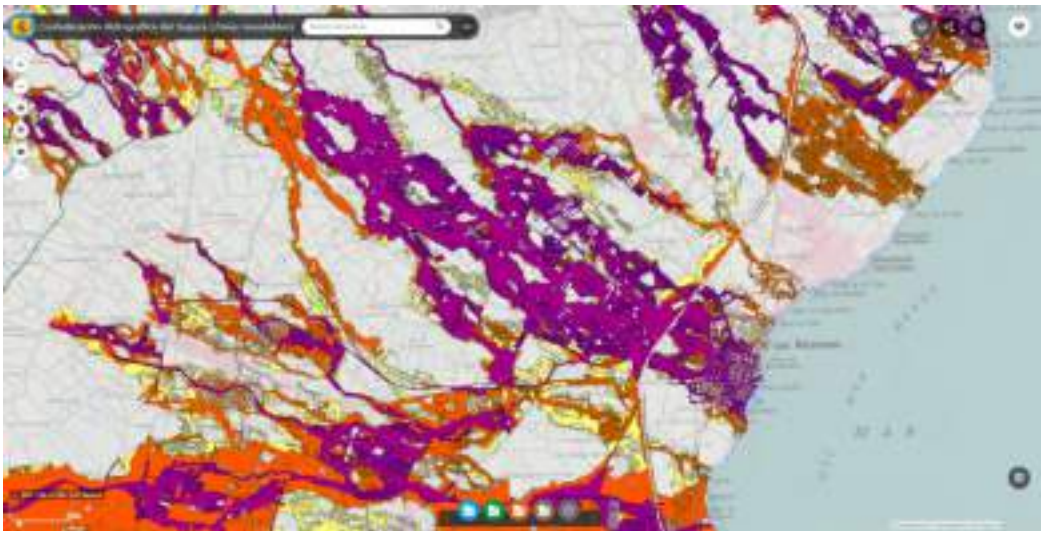


Figura 2. Zona inundable en el área de estudio. Fuente: Visor GIS de Confederación Hidrográfica del Segura.

En los episodios de lluvia producidos en los recientes años se han producido grandes inundaciones y arrastres de sedimentos, que han generado cuantiosos daños a la población local (Figura 3). El objeto del estudio es analizar la variación de la zona inundable teniendo en cuenta diferentes periodos de retorno. Con el fin de contar con una adecuada herramienta de trabajo y planteamiento de posibles soluciones, se analiza la situación actual mediante modelación hidráulica bidimensional en Iber.



Figura 3. Fotografía satélite obtenida en septiembre de 2019. Fuente: Satélite Sentinel del programa Copernicus.

Para la realización del estudio se han establecido y fijado las características físicas de la zona de estudio a partir de cartografía, visitas a campo y ortofotos georreferenciadas.

El cálculo de los hidrogramas para distintos periodos retorno se ha realizado en base al programa HEC-HMS. Los caudales obtenidos han sido empleados para el cálculo de la zona inundable siguiendo la Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino de 2011.

3. CÁLCULOS HIDROLÓGICOS

Previo a la preparación del modelo bidimensional, se realizó un estudio de la red de drenaje de las distintas cuencas que vierten a la población de Los Alcázares. Para dicho análisis se empleó la extensión Arc Hydro Tools de ArcGIS, a partir de un modelo digital del terreno con un tamaño de malla de 5x5 m, disponible en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Dicha extensión permite, entre otras funcionalidades, obtener las pendientes de las subcuencas y cauces, así como sus áreas y longitudes. Durante el proceso se analizó una superficie de drenaje superior a los 500 km^2. Se delimitaron 8 cuencas principales y en torno a 400 subcuencas con un tamaño medio de 1 km^2. La red de drenaje obtenida fue validada en distintas visitas campo y comparada con una red obtenida a partir de otro modelo digital del terreno con un tamaño de malla de 1x1 m.

Para el cálculo del umbral de escorrentía y del número de curva se ha utilizado el modelo digital del terreno con paso de malla de 5x5 m del Instituto Geográfico Nacional, el mapa de usos del suelo del proyecto europeo CORINE Land Cover (CLC) del año 2018, y el mapa de tipos hidrológicos del suelo del proyecto LUCDEME del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Los cálculos realizados consideran una humedad antecedente del suelo media, donde no se ha corregido el valor del umbral de escorrentía.

Caracterizadas las cuencas y cauces, y el umbral de escorrentía para cada subcuenca, la información fue transferida a HEC-HMS (Figura 4) a partir de la extensión HEC-GeoHMS para ArcGIS. Este software permite simular los principales procesos hidrológicos durante un evento y estimar los hidrogramas generados en diversos puntos del territorio.

Para la definición de los diferentes escenarios de cálculo en HEC-HMS, los hidrogramas obtenidos se han calculado con el método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, considerando que el tiempo de retardo es un 60% del tiempo de concentración. La infiltración se ha estimado considerando el método del número de curva del SCS. El tránsito de caudales a lo largo de la red de cauces se ha analizado mediante el método de Muskingum-Cunge.

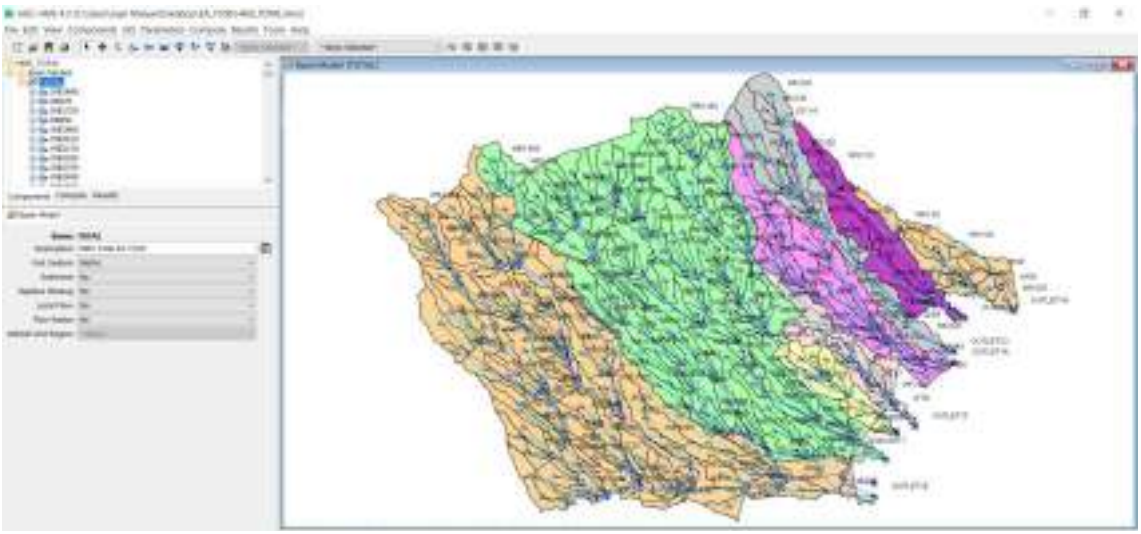


Figura 4. Modelo hidrológico HEC-HMS de la zona de estudio.

3.1. Definición de los escenarios de cálculo

Las lluvias utilizadas para el cálculo de los hidrogramas en HEC-HMS se corresponden con 6 eventos sintéticos para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, según la monografía de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento denominada "Máximas lluvias diarias en la España peninsular" de 1999 para el cálculo de la lluvia máxima en 24 horas, corregidas mediante un coeficiente areal (Norma 5.2-IC. Drenaje Superficial). La distribución temporal de las lluvias sigue un patrón estándar de acuerdo con un hietograma sintético de bloques alternos, con intervalos temporales de 30 minutos y una duración de la lluvia de 12 horas de acuerdo con las curvas intensidad-duración-frecuencia de la Norma 5.2-IC. Drenaje Superficial. Los resultados obtenidos para el periodo de retorno de 500 años pueden ser equiparados al evento ocurrido en septiembre de 2019.

4. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

4.1. Consideraciones

Los cálculos hidráulicos realizados en el presente estudio tienen como objetivo fundamental analizar las zonas inundables en el entorno del Campo de Cartagena que desemboca a través de Los Alcázares. En este sentido, se analiza la situación existente, teniendo en cuenta las infraestructuras y usos del suelo existentes durante la DANA de septiembre de 2019, teniendo en cuenta diferentes periodos de retorno (entre 5 y 500 años). El área de estudio abarca una extensión superior a 80 km^2, con refinamiento de mallado en las grandes infraestructuras y en el municipio de Los Alcázares (Figura 5). El modelo incluye 83 elementos tipo obra de drenaje transversal y 14 hidrogramas de entrada de 48 horas de simulación generados en HEC-HMS.



Figura 5. Extensión del área de estudio.

Los cálculos hidráulicos se han realizado mediante el programa bidimensional IBER, Este programa ha sido desarrollado gracias a la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidade da Coruña), el Grupo de Investigación en Dinámica Fluvial e

Ingeniería Hidrológica, FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya), y el Centro Internacional de métodos numéricos en Ingeniería, CIMNE, con el apoyo del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Se han establecido y fijado las características físicas de la zona de estudio, y se han determinado los caudales de los distintos escenarios a través del programa HEC-HMS.

4.2. Limitaciones del modelo

Tal y como indica la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS, 2020), las zonas inundables obtenidas con los modelos numéricos son simplificaciones del sistema real y tienen importantes limitaciones en cuanto a su coincidencia con la representación de la inundación real que se produciría en un evento concreto. Dichas limitaciones hacen que la inundación real de un evento pueda variar significativamente respecto a lo calculado. Tal y como indica la CHS (2020), algunas de estas limitaciones son:

- Los efectos de erosiones, deslizamientos, sedimentaciones, etc. no se contemplan por lo general en el estudio hidráulico. Esto es debido a la dificultad añadida que implica la resolución de sistemas con lecho móvil, que incluyen cambios de forma y de rugosidad.
- La simulación hidráulica no puede prever los efectos de obstrucciones o derivaciones del flujo que determinados elementos (árboles caídos, vehículos, obras de paso obstruidas, etc.) pueden producir.
- En zonas inundables de gran extensión y fuertemente antropizadas, las dificultades para representar adecuadamente todos los elementos artificiales que influyen en las características del flujo, y las propias limitaciones computacionales del modelo matemático ante la enorme cantidad de datos a procesar, también pueden hacer que los resultados de la inundación real difieran de las previsiones del modelo.

4.3. Información de partida

La información de partida para el estudio hidráulico consiste en:

- Datos de hidrogramas proporcionados por el estudio hidrológico realizado en HEC-HMS.
- Información básica de caracterización física del cauce obtenida del modelo digital del terreno descargado del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de 5x5 m, y de las visitas a campo.
- Información sobre elementos obras de drenaje transversales, obras de paso y obstrucciones en zona de estudio facilitadas por la Confederación Hidrográfica del Segura y obtenidas de las visitas a campo, entre las que destacan las existente en la Autopista AP-7.

4.4. Modelación hidráulica

La modelización hidráulica busca obtener los calados y las velocidades en cualquier punto de la zona a analizar, para las avenidas de interés. El comportamiento de un fluido isótropo viene gobernado por las ecuaciones de Navier-Stokes, que se obtienen a partir de la aplicación de las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. La integración vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido sometido a la presión atmosférica, y bajo las hipótesis de distribución hidrostática de presiones y pendiente de fondo reducida da lugar a las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales.

La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente bien en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas en estuarios por la marea. Por su parte, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple generalmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a comportamientos localmente tridimensionales. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo.

Las ecuaciones de aguas someras o de Saint-Venant en dos dimensiones resuelven los problemas de flujo bidimensional. En la actualidad, los modelos numéricos basados en dichas ecuaciones suelen ser los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, así como en evaluación de zonas inundables. Sin embargo, la modelización del flujo bidimensional requiere un importante esfuerzo en

términos de modelización del terreno, de calibración de parámetros, en particular de la rugosidad, y de tiempo de cálculo respecto a la modelización unidimensional. A cambio, se obtienen resultados más precisos desde el punto de vista de la distribución de las velocidades en la zona de estudio. La utilización de modelos bidimensionales es vital en zonas en las que el campo de velocidades tiene una componente importante en el sentido transversal del flujo.

Iber emplea un esquema de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant. Al módulo de cálculo se le ha adaptado una interfaz que se basa en el software de preproceso y posproceso GiD, desarrollado por CIMNE (Bladé et al., 2014).

4.5. Mallado

Igual que en el caso unidimensional, los mayores errores para reproducir la topografía real del tramo de estudio suelen proceder del Modelo Digital del Terreno (MDT) del que se disponga. En la modelización bidimensional, el dominio de estudio se divide en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). Las variables hidráulicas se resuelven en cada celda o elemento de una malla de cálculo que se obtiene a partir del MDT. Cuanto mayor sea la definición de dicha malla, menor será el error cometido en el cálculo de los calados y las velocidades. Sin embargo, a mayor detalle de la malla, mayor número de elementos y, por tanto, mayor tiempo de cálculo. En este sentido, se debe buscar un equilibrio entre una malla lo suficientemente detallada, capaz de reproducir de manera precisa el terreno, y el tiempo de simulación que requiere cada nivel de detalle.

Las mallas se pueden clasificar en estructuradas y no estructurada. Una malla estructura es aquella que sigue los ejes cartesianos (o polares), y sus nodos pueden ser almacenados en forma de matriz, con el consecuente ahorro de memoria. Una malla no estructurada está formada por elementos más o menos irregulares de 3 y/o 4 lados. Iber trabaja con mallas no estructuradas. La principal ventaja de este tipo de mallas es que se adaptan con gran facilidad a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna.

En este estudio se ha optado por la generación de una malla tipo Red Irregular de Triángulos Rectángulos (Regular Triangular Irregular Network, RTIN), formada por triángulos de lados de distinta longitud, cuyos vértices se encuentran a una cota obtenida a partir del MDT original. En este tipo de mallas se forman triángulos más pequeños en zonas donde se requiere un mayor detalle, disponiendo mayores elementos en zonas donde el detalle requerido es menor.

La opción de utilizar RTINs suele generar geometrías muy aproximadas a la topografía del MDT utilizado, con un número optimizado de elementos y muy robustas frente a problemas de mallado o numéricos (Iberaula, 2012).

4.6. Usos del suelo y rugosidades

Para la definición de las pérdidas de carga por fricción se emplea generalmente la ecuación de Manning, parametrizada en función del coeficiente de Manning que varía en cada zona en función de los usos del suelo.

Para caracterizar el valor de la rugosidad en una serie de polígonos definidos en la zona de estudio, se puede utilizar la identificación realizada en función de los usos del suelo en el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE) y en el proyecto europeo CORINE LAND COVER.

El SIOSE tiene una escala equivalente 1:25.000 y agrupa los usos por polígonos según su porcentaje de influencia. Por su parte, el CORINE Land Cover delimita los usos del suelo en una cartografía a escala 1:100.000. Al estar más actualizada la capa disponible en el IGN, en este estudio se ha considerado los usos del suelo del proyecto CORINE Land Cover, cuya versión más actual fue publicada en 2018.

Para cada polígono identificado en el proyecto CORINE Land Cover, se ha llevado a cabo la asignación de un coeficiente de rugosidad de Manning en función de los distintos usos del suelo, teniendo en cuenta las recomendaciones de la Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (2011).

4.7. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en la simulación son necesarias para resolver los problemas de aguas someras bidimensionales. El número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento).

En un contorno de entrada es necesario imponer 3 condiciones de contorno si el régimen es supercrítico (una para cada una de las tres ecuaciones de Saint-Venant), mientras que si se produce régimen subcrítico es suficiente con imponer 2 condiciones. En un contorno de salida se impone una única condición si el régimen es subcrítico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico.

Si se imponen menos condiciones de las necesarias, las ecuaciones estarán indeterminadas y no se obtendrá una solución correcta. Las condiciones concretas a imponer pueden ser el calado, las componentes de la velocidad, o una combinación de ambos.

El régimen subcrítico es el más habitual en cauces fluviales. El régimen supercrítico se produce generalmente en cauces con pendientes fuertes (normalmente situados en alta montaña), flujo sobre estructuras hidráulicas (vertederos, compuertas de regulación, etc.) o cambios bruscos de la geometría.

Como condiciones de contorno de entrada en las simulaciones numéricas se ha considerado régimen subcrítico, imponiendo la condición de hidrograma de entrada en dirección normal al contorno (6 entradas). Adicionalmente, se ha considerado la entrada de 8 hidrogramas de entrada generados en el interior del área de estudio, simuladas como entradas tipo fuente en los puntos de desagüe de las diferentes subcuentas interiores.

Para reproducir la condición de contorno de aguas abajo o de salida, se ha simulado una parte del Mar Menor. Aunque el nivel de la pleamar viva equinoccial en el Mar Menor puede considerarse despreciable, durante el episodio de la DANA de septiembre de 2019 se reportaron elevaciones del nivel del mar de 0.53 m, con picos de 0.70 m (La Opinión de Murcia, 2019). En este sentido, se consideraron sobreelevaciones entre 0.40 y 0.70 m en la condición de contorno de salida al Mar Menor. De este modo, los calados obtenidos para los distintos periodos de retorno quedan del lado de la seguridad.

4.8. Condiciones internas

El área de estudio cuenta con diferentes estructuras, pasos, puentes y obras de drenaje transversal que modifican el drenaje hacia el Mar Menor. Teniendo en cuenta la información facilitada por la CHS, y las comprobaciones realizadas en las distintas visitas de campo, en la simulación se han considerado 83 estructuras de drenaje transversal. La mayoría de estas estructuras se encuentran en la Autopista del Mediterráneo AP-7 a su paso por el municipio de Los Alcázares.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. Comprobación y calibración del modelo

Teniendo en cuenta las inundaciones producidas durante el episodio de septiembre de 2019

(equiparable a un periodo de retorno de 500 años), se obtuvieron las marcas de nivel alcanzado por el agua en diferentes puntos de Los Alcázares, y se contrastaron con los resultados obtenidos con el modelo numérico, obteniéndose en general un adecuado ajuste del mismo (ver Figuras 6 y 7).



Figura 6. Fotos de registros de calados máximos tras el evento de septiembre de 2019: Izquierda) Calle Dr. Rafael García Guillén; Derecha) Calle de la Fuensanta.

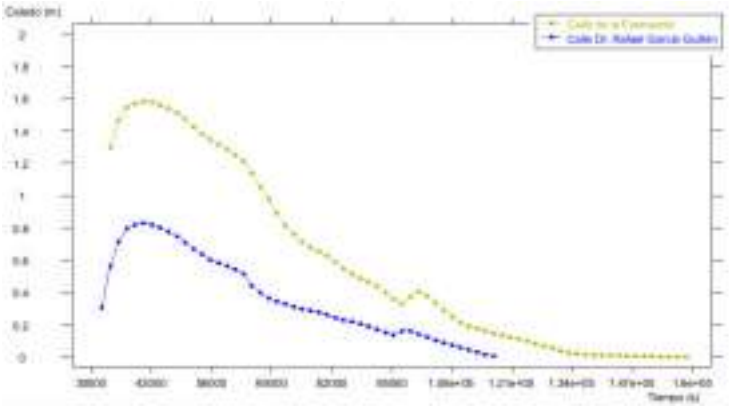


Figura 7. Evolución de calados en dos puntos para un periodo de retorno de 500 años.

5.2. Resultados de los distintos escenarios

Las siguientes figuras muestran los resultados de calados máximos para los diferentes periodos de retorno considerados en este estudio.



Figura 8. Calados máximos para periodo de retorno de 5 años.



Figura 9. Calados máximos para periodo de retorno de 10 años.



Figura 10. Calados máximos para periodo de retorno de 25 años.



Figura 11. Calados máximos para periodo de retorno de 50 años.



Figura 12. Calados máximos para periodo de retorno de 100 años.

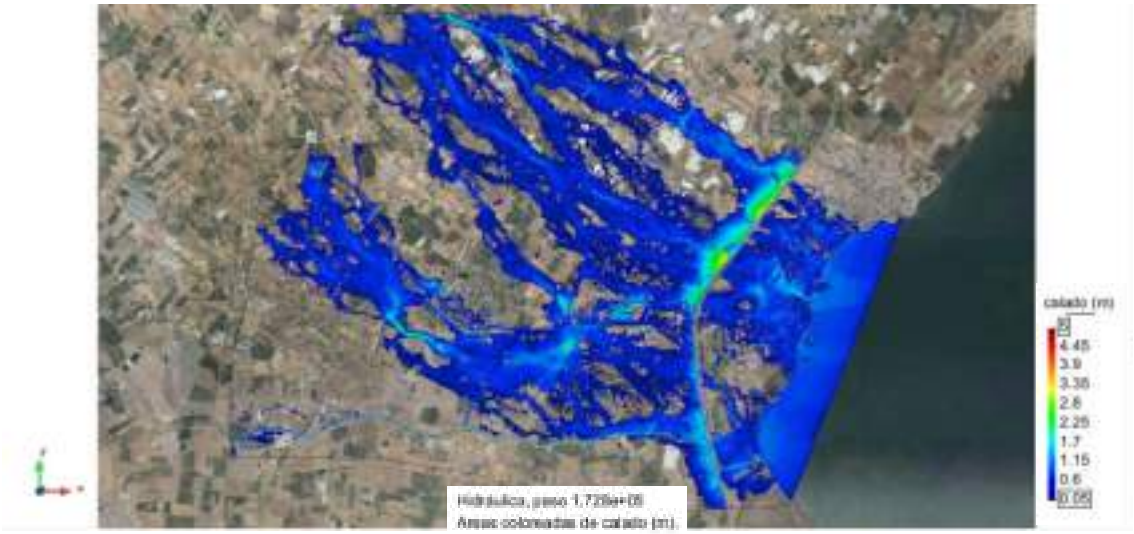


Figura 13. Calados máximos para periodo de retorno de 500 años.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observa que el flujo tiende a discurrir de forma ordenada por los cauces esperables para periodos de retorno de hasta 25 años. Pese a que en todos los escenarios discurre flujo superficial por el entramado urbano, los calados alcanzados en el núcleo urbano empiezan a ser importantes para periodos de retorno superiores a 25-50 años.

El efecto embalse de la Autopista AP-7 aparecen en todos los periodos de retorno en la zona norte del municipio (Figura 14), aumentando el volumen almacenado conforme se incrementa el periodo de retorno y, por tanto, la laminación del caudal. Este fenómeno de embalse y disminución del caudal punta puede generar una falsa sensación de seguridad puesto que se incrementan los calados aguas arriba de la citada autopista, y por tanto la energía almacenada en el flujo. La sobreelevación de la lámina de agua incrementa las velocidades, y en consecuencia la capacidad erosiva aguas abajo de las obras de drenaje transversal de la AP-7. El efecto embalse genera además un transvase entre cuencas, modificando las zonas de drenaje y el volumen total de los hidrogramas aguas arriba y aguas abajo de la AP-7.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el terraplén de la AP-7 no ha sido diseñado como dique frente a inundaciones; su posible rotura o sobrevertido puede generar inundaciones en zonas no previstas en los mapas la cartografía de zonas inundables.

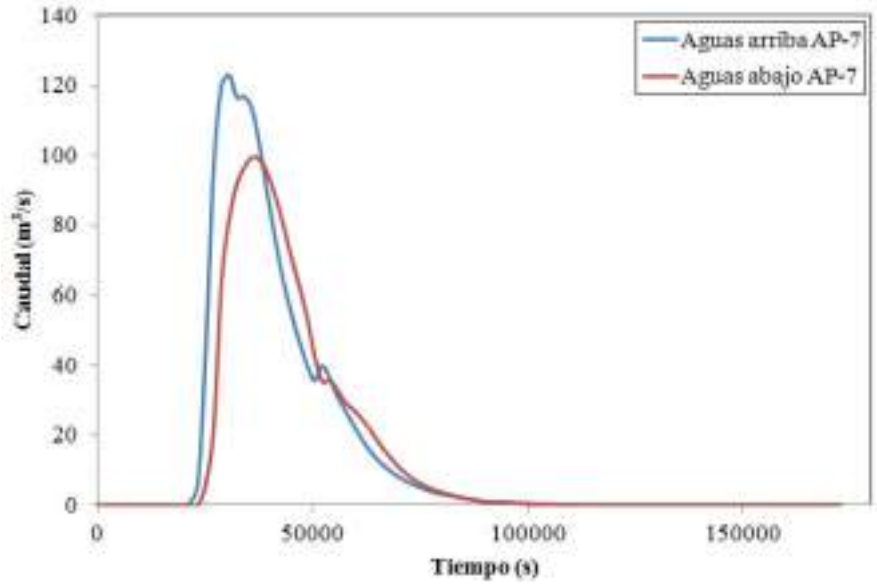


Figura 14. Efecto embalse de la Autopista AP-7 para periodo de retorno de 25 años.

Las siguientes figuras muestran los resultados de velocidades máximas para los diferentes periodos de retorno. Los resultados obtenidos muestran una tendencia similar a la observada en los resultados de calados; las velocidades en el núcleo urbano son destacables para periodos de retorno superiores a 25-50 años. Igualmente, destacan las velocidades obtenidas aguas abajo de las obras de drenaje transversal de la AP-7, cuya magnitud aumenta conforme se incrementa el efecto embalse de la estructura lineal.



Figura 15. Velocidades máximas para periodo de retorno de 5 años.



Figura 16. Velocidades máximas para periodo de retorno de 10 años.



Figura 17. Velocidades máximas para periodo de retorno de 25 años.



Figura 18. Velocidades máximas para periodo de retorno de 50 años.

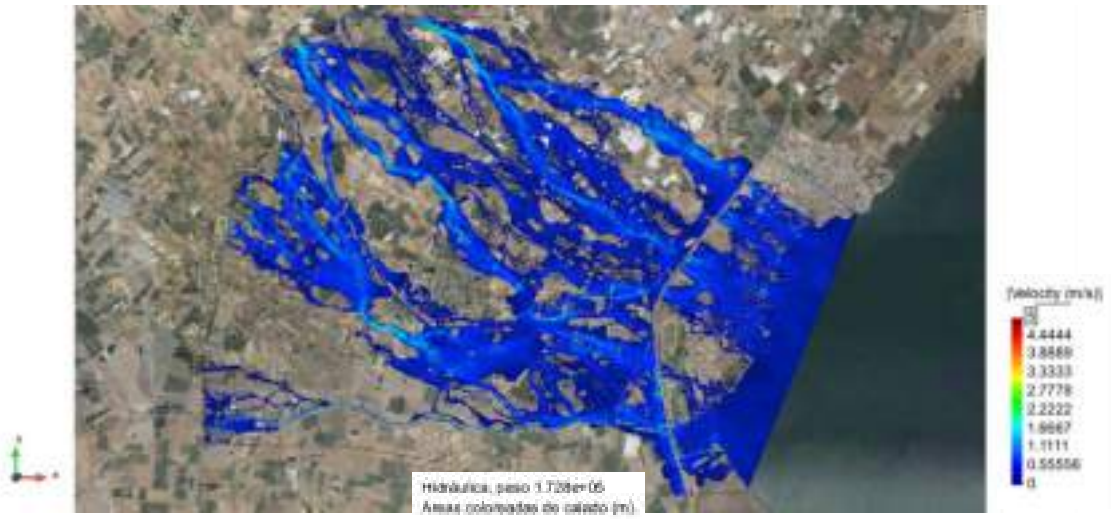


Figura 19. Velocidades máximas para periodo de retorno de 100 años.

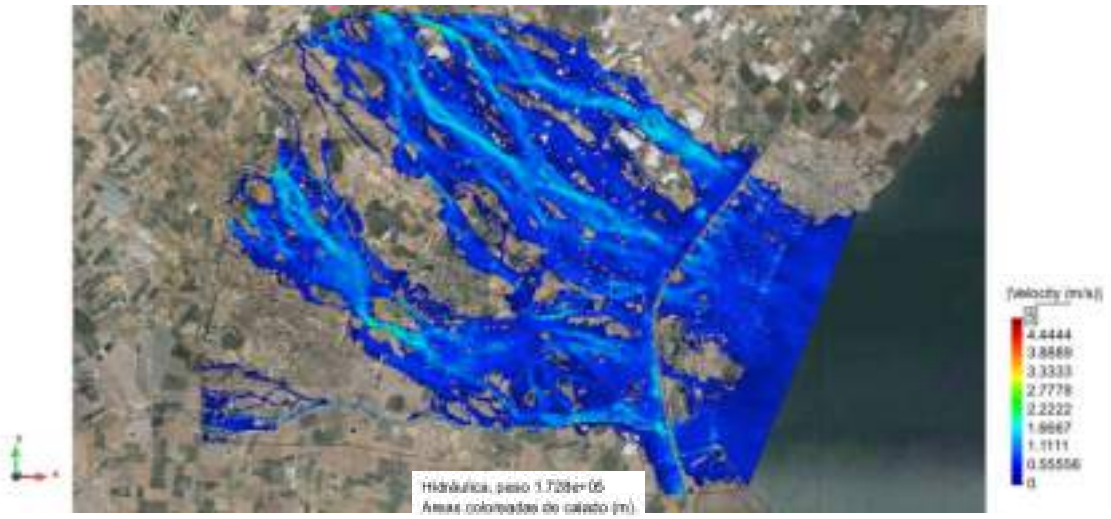


Figura 20. Velocidades máximas para periodo de retorno de 500 años.

5.3. Capacidad de movilizar sedimentos

El episodio de inundaciones sufrido en septiembre de 2019 dejó como consecuencia un enorme transporte de sedimentos que se depositó en la zona urbana y en el mar menor. Así lo constatan las innumerables imágenes y videos reportados durante los días posteriores a la inundación (por ejemplo, las mostradas por 7 Televisión Región de Murcia).

Teniendo en cuenta el diámetro que representa el inicio de movimiento según el ábaco de Shields, la Figura 21 muestra el máximo diámetro crítico que es capaz de movilizar el flujo en el evento de 500 años de periodo de retorno. Se observan muchas zonas con valores de diámetro crítico superiores a 0.05 m, con valores puntuales superiores a 0.20 m. Dichos resultados permiten comparar cualitativamente la capacidad de transporte del agua respecto a la fotografía del satélite Sentinel (ver Figura 3). El transporte de sedimentos agrava la capacidad de generar daños en episodios de inundaciones.

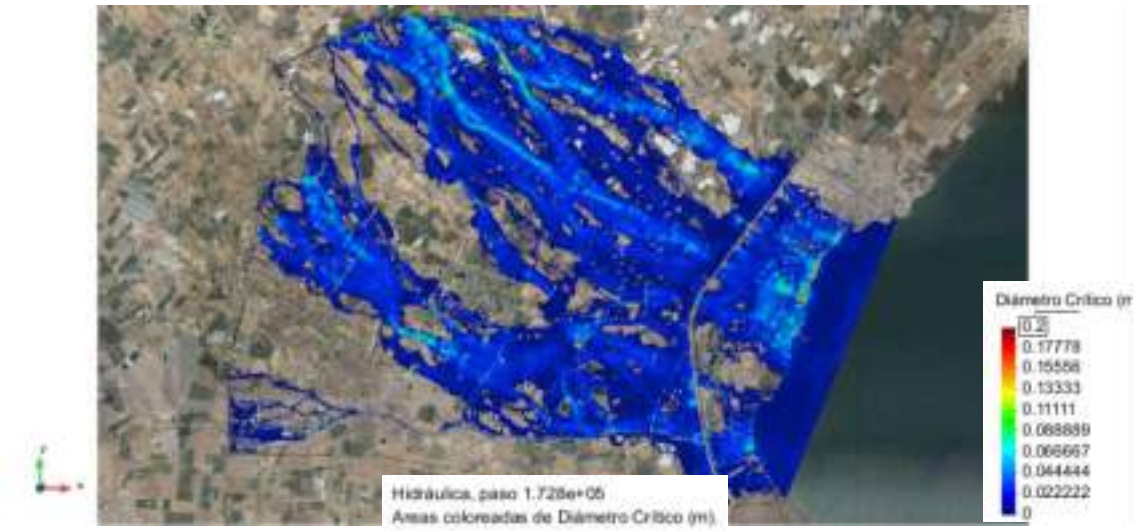


Figura 21. Máximo diámetro crítico para periodo de retorno de 500 años.

Como ejemplo de la capacidad de arrastre del flujo, la Figura 21 muestra el diámetro crítico en dos puntos de la rambla de la Pescadería, ubicados aguas arriba y aguas abajo del puente de la Avenida de la Libertad. Dichos puntos muestran diámetros con valores máximos superiores a 0.35 m, lo que implica una elevada capacidad de movilizar y arrastrar objetos flotantes en un entorno urbano.

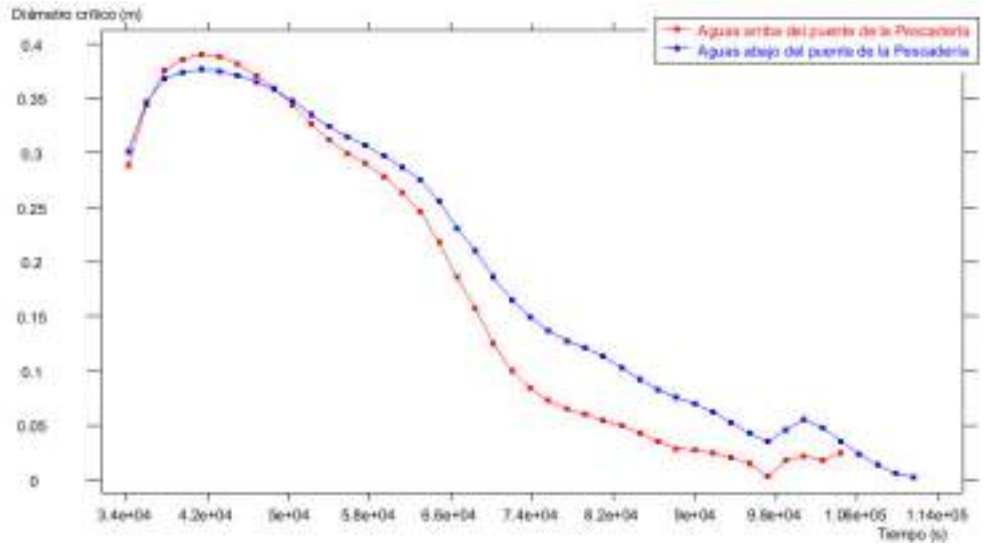


Figura 22. Evolución del diámetro crítico para periodo de retorno de 500 años.

5.4. Mapas de daño grave de los distintos escenarios

Teniendo en cuenta los resultados de máximo calado y máxima velocidad obtenidos en cada escenario, se pueden identificar las zonas propensas a sufrir daño grave, tal y como se recoge en el RD 9/2008. Las siguientes figuras ponen de manifiesto que el núcleo urbano comienza a sufrir daños graves según el RD para periodos de retorno superiores a 25 años. Para periodos de retorno de 500 años, gran parte del núcleo urbano se encuentra en zona de daños graves frente a inundaciones.



Figura 23. Máximo daño grave según el RD9/2008 para periodo de retorno de 5 años.



Figura 24. Máximo daño grave según el RD9/2008 para periodo de retorno de 10 años.



Figura 25. Máximo daño grave según el RD9/2008 para periodo de retorno de 25 años.



Figura 26. Máximo daño grave según el RD9/2008 para periodo de retorno de 50 años.



Figura 27. Máximo daño grave según el RD9/2008 para periodo de retorno de 100 años.



Figura 28. Máximo daño grave según el RD9/2008 para periodo de retorno de 500 años.

6. CONCLUSIONES

En este estudio se ha realizado un estudio bidimensional del municipio costero de Los Alcázares. La zona analizada está catalogada como Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) en el Proyecto de Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura correspondiente al período 2015-2021.

Los modelos numéricos ponen de manifiesto la escasez de definición y delimitación de los cauces efímeros, que tienen a desaparecer en la zona media-baja del Campo de Cartagena. Dichos cauces tienden a desbordar para periodos de retorno superiores a los 25 años.

La falta de definición de las zonas de drenaje se agrava en el casco urbano, el cual muestra zonas propensas a las inundaciones para escenarios de elevada probabilidad (bajos periodos de retorno). A partir de periodos de retorno de probabilidad de ocurrencia media (25-50 años) se producen inundaciones importantes en el núcleo urbano, mientras que, para periodos de retorno superiores a 100 años, gran parte del entramado urbano se cataloga como propenso a sufrir daño grave según el RD 9/2008.

Los resultados ponen de manifiesto la necesidad de realizar un planeamiento urbanístico teniendo en cuenta la vulnerabilidad del núcleo urbano a sufrir inundaciones, plantear estudios de alternativas que permitan volver a conectar las zonas de desagüe con los lechos de los cauces efímeros y/o que permitan desaguar grandes caudales al mar a través del entorno urbano. Por otro lado, es necesario concienciar a la población de la necesidad de proteger sus hogares/comercios con sistemas de protección temporales en escenarios de lluvias.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. y Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10.
- Confederación Hidrográfica del Segura (2020). *Cartografía de Zonas Inundables (ZI)* > Zonas inundables y gestión de riesgo > Información > Confederación Hidrográfica del Segura. https://www.chsegura.es/chs/cuenca/gestioninundacion/cartografia.html
- Confederación Hidrográfica del Segura (2020). *Zonas inundables y gestión de riesgo* > Información > Confederación Hidrográfica del Segura. https://www.chsegura.es/chs/cuenca/gestioninundacion/
- Centro Nacional de Información Geográfica (2020). *CORINE Land Cover 2018*.
- Comisión Europea. *Directiva 2007/60CE de evaluación y gestión de los riesgos de inundación*.
- Demarcación Hidrográfica del Segura (2019). *Revisión y actualización de los mapas de peligrosidad y riesgo por inundación de las áreas con riesgo potencial significativo de inundación*. 2º ciclo. Documento para la consulta pública.
- Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*.
- Hydrologic Engineering Center (2018). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual.* Version 4.3. US Army Corps of Engineers.
- Iberaula (2012). *Iber. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario*. Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Iberaula (2014). *Iber. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico*. Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

- La Opinión de Murcia (2019). *Gota fría en la Región de Murcia: la quinta parte del agua del Mar menor procede de escorrentías*. https://www.laopiniondemurcia.es/comunidad/2019/09/17/mar-menor-subio-70-centimetros/1052844.html
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (2011). *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*.
- Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.
- Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 849/86 de 11 de abril).
- Real Decreto 18/2016, de 15 de enero publicado el 22 de enero de 2016. Proyecto de Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura correspondiente al período 2015-2021.
- 7 Televisión Región de Murcia (2019). *Siguen los trabajos de limpieza en Los Alcázares, aun cubierto de barro*. http:///7tvregiondemurcia.es/siguen-los-trabajos-de-limpieza-en-los-alcazares-aun-cubierto-de-barro/

LA GESTIÓN EXTRAORDINARIA DE GRANDES INFRAESTRUCTURAS DURANTE LA DANA DE SEPTIEMBRE DE 2019: EL AZUD DE OJÓS

Carlos Marco Ayala
Dr. Ingeniero de Caminos, Jefe de Servicio de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Segura, CHS
c.marcoayala@chsegura.es
https://www.chsegura.es/chs/index.html

RESUMEN

Con la aparición de fenómenos naturales adversos se hace imprescindible su gestión mediante las medidas de mitigación disponibles en ese momento, siendo una de las medidas más eficaces, el empleo de grandes infraestructuras construidas a tal efecto. En esta ponencia se describen las actuaciones que, de forma extraordinaria, fueron llevadas a cabo en la explotación de la presa de Ojós durante el 13 de septiembre de 2019 con motivo de las lluvias extraordinarias que tuvieron lugar de forma generalizada en la Cuenca del Segura, como un ejemplo más de otras muchas actuaciones que se llevaron a cabo por la Confederación Hidrográfica del Segura.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y objeto de estudio

Entre los días 12 y 15 de septiembre de 2019 la Cuenca Hidrográfica del Segura ha sufrido uno de los episodios lluvias más intensos y devastadores desde que se tienen registros. Ha sido generalizado en toda la superficie de la demarcación, especialmente grave en zonas como el Campo de Cartagena, Ramblas Costeras, Vega Alta y Vega Media, alcanzando en la Vega Baja el valor máximo de lluvia acumulada en cuatro días. En concreto 483 l/m² en Orihuela (cabe destacar que la precipitación media a lo largo de un año completo en la Cuenca del Segura, teniendo en cuenta las series históricas, está en el entorno de los 300 l/m²).

La precipitación media durante este episodio de lluvias repartida en todo el territorio ha sido de 126,7 l/m², lo que equivale a un volumen total de 2.438 hectómetros cúbicos (la capacidad de almacenamiento de agua en toda la infraestructura de la Cuenca supera escasamente los 1.000 hectómetros cúbicos).

Los caudales que han circulado por el río han superado los 200 m³/s alcanzando niveles que han superado su capacidad dando lugar a desbordamientos e inundaciones en diferentes puntos de Vega Media y Vega Baja, también Ramblas Costeras como la del Albujón y las Ramblas afluentes del río Almanzora en Almería han visto superada su capacidad.

De entre los cientos de infraestructuras y recursos humanos que intervinieron durante este episodio, se redacta el presente artículo como síntesis de las afecciones y función ejercida por el azud de Ojós, pieza clave en la distribución de caudales en la cuenca del Segura.

1.2. Descripción técnica del azud de Ojós

1.2.1. Generalidades

La presa de Ojós se encuentra sobre el cauce del río Segura en el término municipal de Ojós, entre las poblaciones de Blanca y Ojós, pertenecientes a la provincia de Murcia.

Se trata de una presa de gravedad, de hormigón vibrado, de 17,27 m de altura máxima sobre cimientos y 62 m de longitud en coronación. La presa corona a la cota 140,27 (cota del eje de la calzada) con una anchura de 9 m, siendo su disposición en planta poligonal con tres lados.

La presa de Ojós tiene como usos principales la regulación de caudales para regadío y abastecimiento a poblaciones, así como la producción de energía hidroeléctrica. En función del riesgo potencial de rotura, la presa de Ojós se clasifica dentro de la categoría A.



Figura 1. Vista aérea del embalse de Ojós.

1.2.2. Finalidad del aprovechamiento

La presa deriva las aportaciones del río Segura y del sistema Tajo-Segura para el abastecimiento de las Vegas Media y Baja del Segura, por medio de dos canales que parten de sendas márgenes del río. El canal de la margen izquierda transporta el agua por gravedad para el abastecimiento de los riegos de las Zonas III y IV del Trasvase Tajo-Segura, posteriormente se incorpora al canal de Crevillente y continúa hasta el embalse de la Pedrera, naciendo de éste el canal del Campo de Cartagena. En este canal se sitúan también las tomas de los abastecimientos de Murcia, Torrealta y la Pedrera (de la Mancomunidad de los Canales de Taibilla), que depuran al año del orden de 100 hm^3 y, junto con los caudales procedentes del río Taibilla, abastecen a una población cercana a los 1,5 millones de habitantes.

La toma del canal de la margen derecha recoge aguas que, por medio de la impulsión de Ojós, son llevadas hasta el embalse de Mayés, desde donde se distribuyen para abastecer a los riegos de la Zona V, Sangonera, Librilla, Alhama, Totana, Lorca, abastecimiento de Lorca y riegos de Almería. Asimismo, la central hidroeléctrica del Solvente, situada a unos 800 m aguas abajo de la presa, permite la turbinación de los caudales fluyentes para la producción de energía hidroeléctrica. Los trabajos de construcción de la presa de Ojós comenzaron el día 15 de Julio de 1972.
El día 15 de diciembre del año 1976, se dieron por finalizadas las obras.

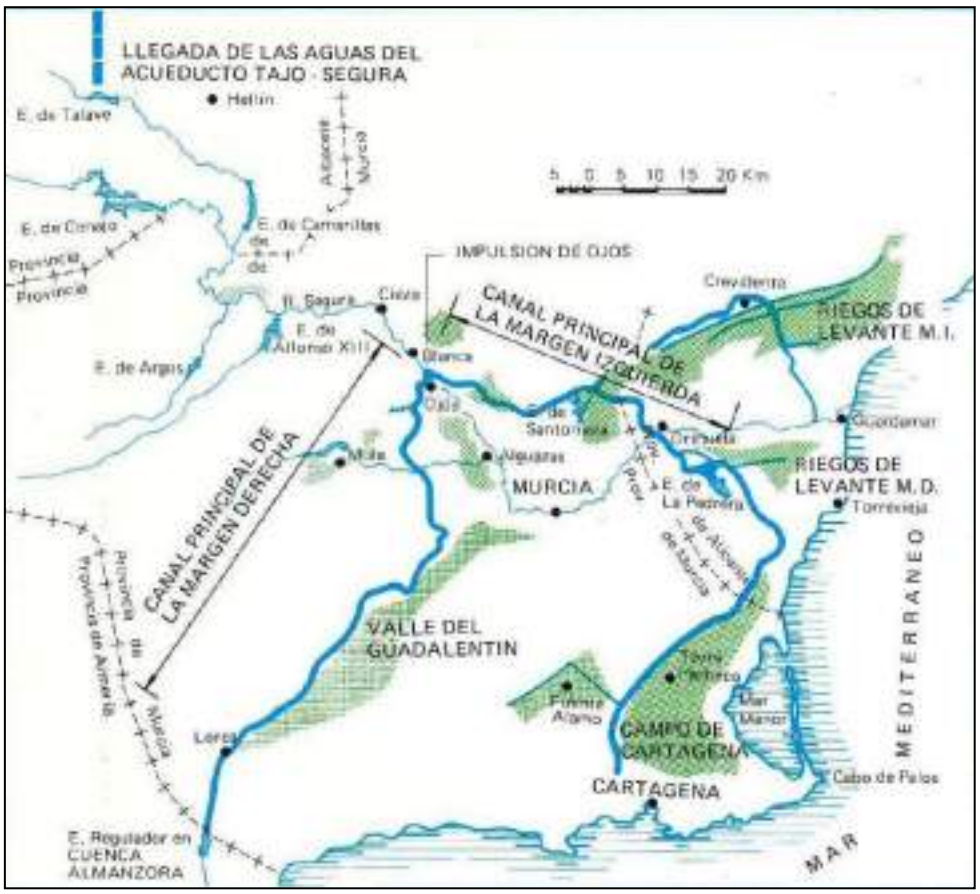


Figura 2. Red de explotación del azud de Ojós.

1.2.3. Embalse

El embalse de Ojós ha sufrido desde la construcción de la presa un importante aterramiento propiciado por la gran erosionabilidad de gran parte de los terrenos que conforman su cuenca vertiente y el carácter torrencial de las precipitaciones, en especial en toda la cuenca baja del embalse.

La capacidad del embalse ha resultado desde entonces muy mermada por la acumulación de sedimentos que llegan a aflorar en numerosos puntos aún con la lámina de agua al Nivel Máximo Normal. Debido a ello, se estima que de los 2,93 hm³ de capacidad inicial del embalse, se ha visto reducido hasta los 0,65 hm³.



Figura 3. La acumulación de sedimentos ha propiciado la aparición de islotes de alto valor ambiental.

1.2.4. Órganos de desagüe

1.2.4.1. Aliviadero

La presa de Ojós posee un único aliviadero de superficie, situado en poligonal sobre la cerrada, en el centro de la misma, ocupando la práctica totalidad de ella y en posición frontal respecto de la corriente del río. La zona de vertido, con una longitud libre total de 27 metros, se distribuye en tres vanos de 9 metros de ancho por 6 metros de altura, separados por pilas de 3 metros de espesor y cerrados por compuertas Vagón.

El perfil del labio es del tipo Creager, con el umbral de vertido a la cota 132,55 m y dimensionado para una lámina de vertido de 7 metros. Las tres compuertas Vagón, fabricadas por MACOSA, tienen unas dimensiones de 9 x 6 m².



Figura 4. Aliviadero y sus compuertas vagón.

1.2.4.2. Desagües de fondo

La presa de Ojós dispone de 4 conductos de desagüe, situados 2 en la margen derecha y los otros 2 en la margen izquierda, cuyos ejes se encuentran a la cota 130,00 y discurren paralelos en dirección normal a la presa. Los cuatro conductos están cerrados, cada uno de ellos, por un par de válvulas de 1.500 mm de diámetro: una de seguridad, del tipo mariposa y otra de regulación, de chorro hueco, tipo Howell- Bunger, disponiendo de las correspondientes tuberías y válvulas auxiliares de by-pass, purga y aducción de aire.

1.3. Efecto laminador del embalse

En la técnica, se conoce como laminación de avenidas al fenómeno hidráulico que se produce en los embalses durante la evacuación de riadas. En el desarrollo del proceso, la punta de la crecida al pasar por el embalse se reduce en magnitud y se retrasa en el tiempo. Este fenómeno depende de la capacidad de volumen que tenga el embalse, y la capacidad de sus órganos de desagüe.

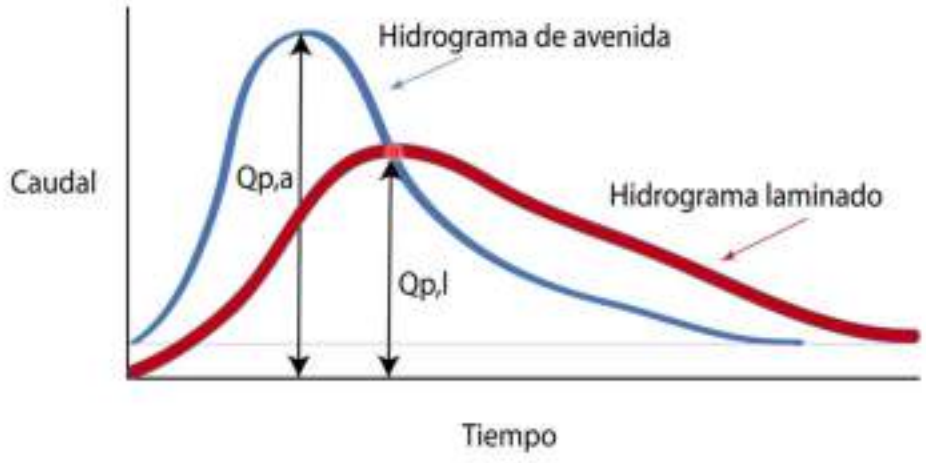


Figura 5. Hidrogramas ilustrativos sobre el concepto de laminación.

La principal función del embalse de Ojós es la derivación de agua a través de los canales para el abastecimiento de las vegas del Segura. Los órganos de desagüe (aliviadero y desagües de fondo) de la presa de Ojós disponen de una capacidad conjunta de evacuación con el nivel del embalse a cota del Nivel Máximo Normal (138,55 m.s.n.m.) de 860 m³/s, caudal superior a la punta de la avenida de proyecto, por lo que dicha avenida, y cualquier otra cuyo caudal punta no supere estos 860 m³/s, puede evacuarse mediante la adecuada maniobra de las compuertas sin que ascienda en ningún momento el nivel del embalse por encima del nivel inicial (NMN). En este caso el embalse no produce ningún efecto de laminación, coincidiendo la punta de la avenida entrante con la de los vertidos a través de los órganos de desagüe.

Por otra parte, la capacidad del vaso del embalse entre la cota 138,55 m.s.n.m. (Nivel Máximo Normal) y la 138,94 m.s.n.m. (Nivel de Avenida Extrema) es tan sólo 0,34 hm³, volumen insignificante si se compara con la aportación de las grandes avenidas en la cuenca del Segura (132 hm³ para la Avenida de Proyecto). Por ello, tanto en el caso de que se permitiera el ascenso del nivel del embalse en avenidas con puntas de caudal inferiores a 280 m³/s, como en el caso de que su ascenso sea inevitable por ocurrir avenidas de mayor caudal, el efecto laminador del embalse debe considerarse despreciable. A todos los efectos se considera por lo tanto que los caudales máximos evacuados a través de los órganos de desagüe de la presa de Ojós en situación de avenida son iguales a los caudales punta de las avenidas entrantes al embalse. Por tanto, tal y como se verá más adelante, pese a que el embalse no debe tener una función laminadora, sí que ejerció esta labor en el episodio de lluvias que nos ocupa.

1.4. Protocolos de actuación ante riesgo de inundaciones y descripción de los escenarios de emergencia

La gestión de emergencias desde el punto de vista de la seguridad frente a inundaciones está enmarcada dentro del Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones y los correspondientes Planes de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones de cada una de las Comunidades Autónomas afectadas. En el caso particular de la CHS, estos planes se corresponden con las autonomías de Murcia, Comunidad Valenciana, Castilla-La Mancha y Andalucía.

A su vez, dentro de los Planes de Protección Civil autonómicos, se encuentran incluidos los Planes de Emergencias de las presas correspondientes, todo ello de conformidad con lo dispuesto en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (Resolución de 31 de enero de 1995). Los dispositivos de actuación se activan en función de la situación de la emergencia, que va íntimamente relacionada con los escenarios de seguridad y de peligro de rotura de presas. Estos escenarios están recogidos dentro del Plan de Emergencia y son los siguientes:

- **Escenario 0** o de control de la seguridad: las condiciones existentes y las previsiones, aconsejan una intensificación de la vigilancia y el control de la presa, no requiriéndose la puesta en práctica de medidas de intervención para la reducción del riesgo.
- **Escenario 1** o de aplicación de medidas correctoras: se han producido acontecimientos que de no aplicarse medidas de corrección (técnicas, de explotación, desembalse, etc.), podrían ocasionar peligro de avería grave o de rotura de la presa, si bien la situación puede solventarse con seguridad mediante la aplicación de las medidas previstas y los medios disponibles.
- **Escenario 2** o excepcional: existe peligro de rotura o avería grave de la presa y no puede asegurarse con certeza que pueda ser controlado mediante la aplicación de las medidas y medios disponibles.
- **Escenario 3** o límite: la probabilidad de rotura de la presa es elevada o ésta ya ha comenzado, resultando prácticamente inevitable el que se produzca la onda de avenida generada por dicha rotura.

Como se verá en el siguiente capítulo, este episodio obligó la declaración del escenario 1, y estuvo a 9 cm de cota de lámina de la declaración del escenario 3.

2. DESCRIPCIÓN DEL EPISODIO

2.1. Estudio hidrológico

A continuación, se muestran los hietogramas del episodio de lluvias en los pluviómetros de Ojós y Venta del Olivo, y debajo se los caudales registrados por el SAIH (Sistema de Alerta e Información Hidrológica) en el aforo inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del azud de Ojós1.

[1] Cabe mencionar que el aforo de aguas arriba marca de más ya que se ha estimado con las curvas de embalse una punta de unos 220 m³/s frente a los 300 m³/s que marca el aforo.

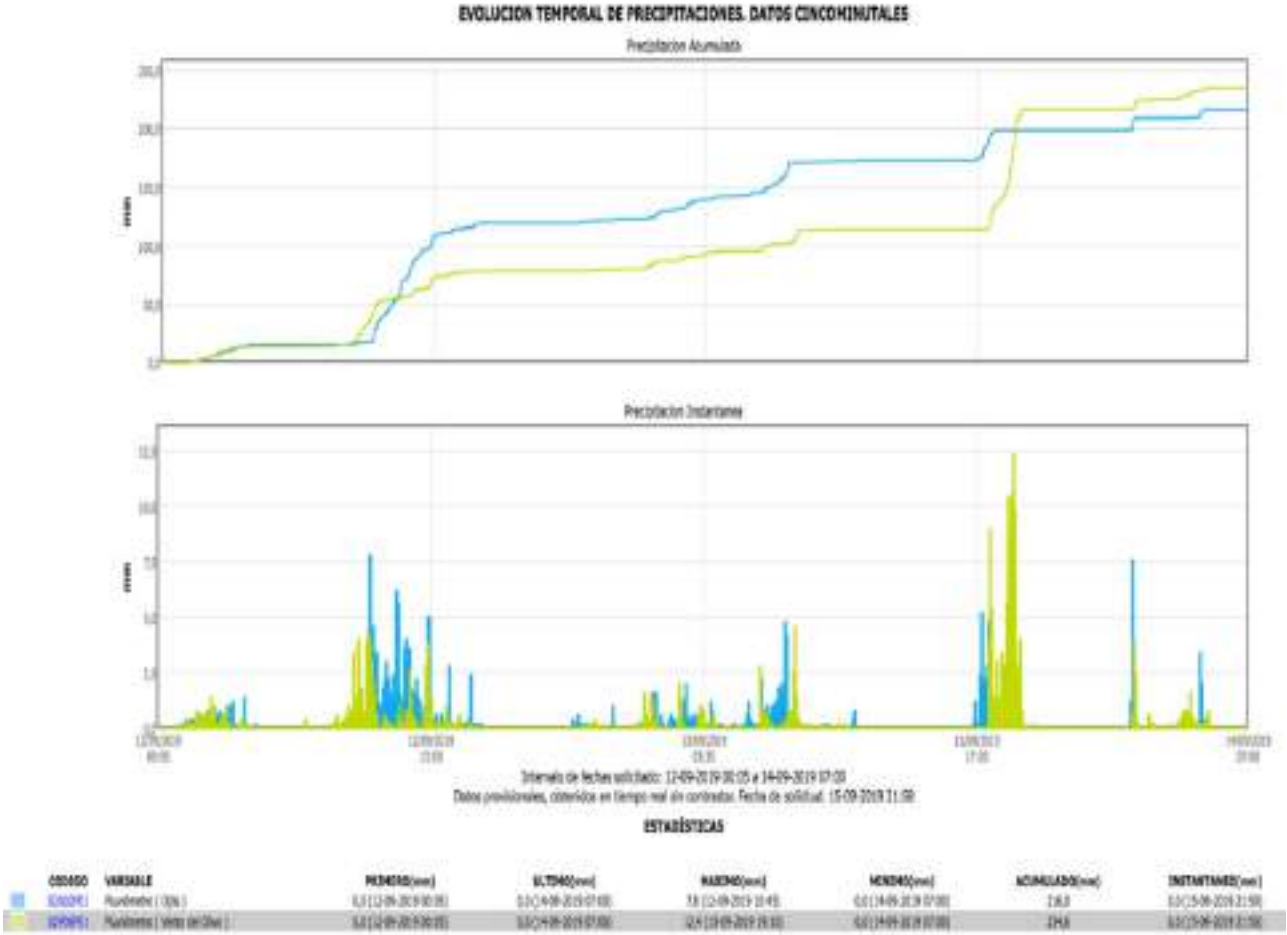


Figura 6. Evolución Temporal de Precipitaciones. Datos Cincominutales.

Observando ambos gráficos (Figuras 6 y 7), se puede concluir:

1. La relación directa lluvia-escorrentía, ya que la distribución de lluvias se ve directamente replicada en el caudal del río. Esta proporcionalidad se debe a la saturación del terreno debido a las lluvias anteriores, y a la gran pendiente de la cuenca receptora, provocando así periodos de concentración2 menores a una hora.
2. El episodio en el azud puede dividirse en dos subepisodios o puntas de lluvia, la del día 12 a las 16:20 y la de la noche del 13 de septiembre. El primer subepisodio fue laminado sin problemas por la presa, siendo el segundo episodio el que verdaderamente solicitó de sobremanera a la infraestructura.
3. Centrándonos en la Figura 7, se aprecia la labor laminadora del embalse, ya que el agua entrante (en verde), es retenida por la presa, atrasando el pico de la avenida, y disminuyéndolo.

[2] Se define como periodo de concentración al tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida

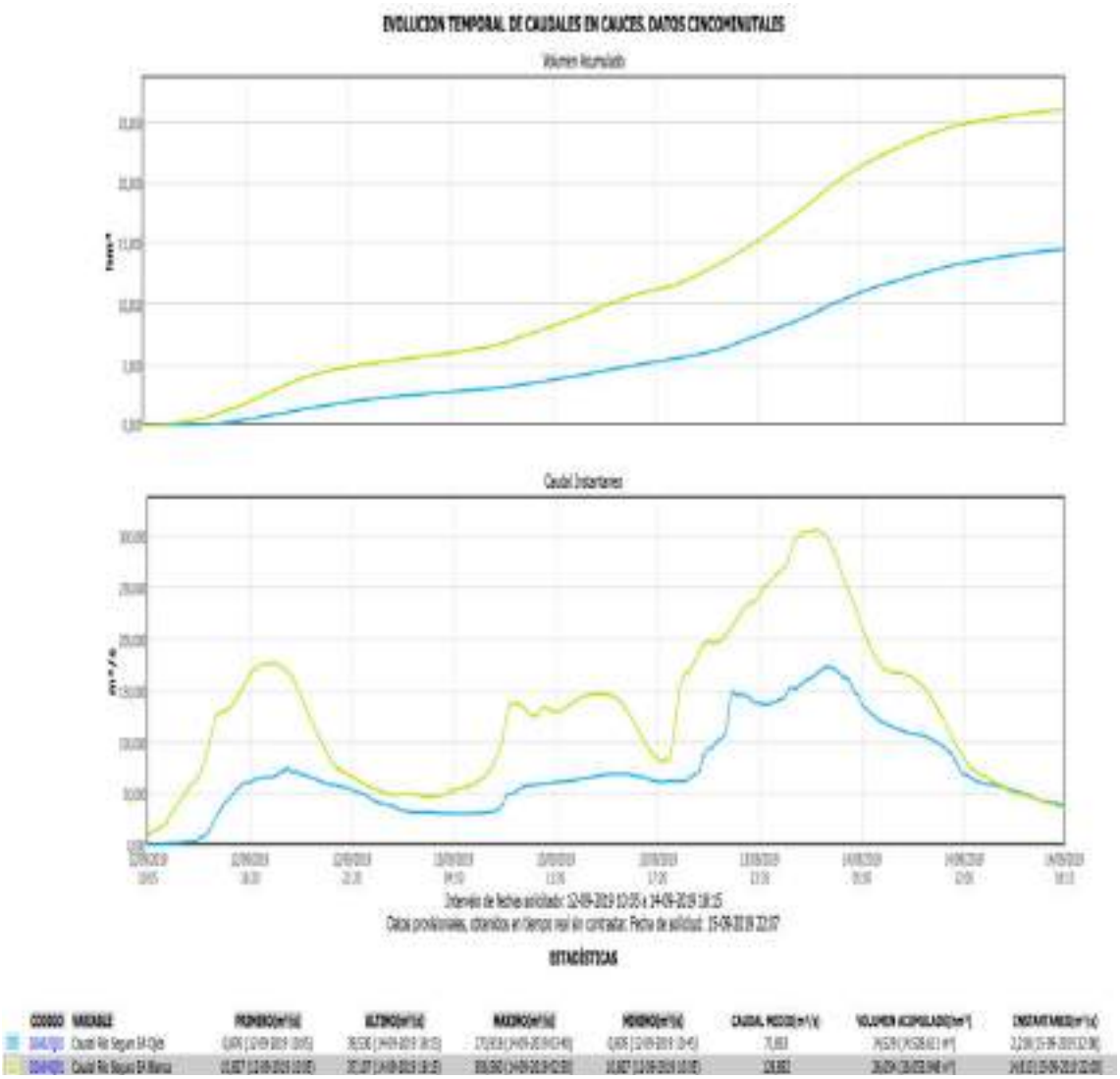


Figura 7. Hidrograma de la estación de aforos de Blanca (en verde) y la inmediatamente aguas debajo del azud de Ojós (en azul).

2.2. Descripción de las maniobras

Una vez analizadas las características del episodio, pasan a describirse las maniobras realizadas de acuerdo con las Normas de explotación de la presa y su Plan de emergencias.

Día 11 de septiembre:

Como previsión, se redujeron las aportaciones de cabecera para satisfacer únicamente el caudal ecológico.

- 12:00 horas.
  Se da orden de enviar una máquina mixta al azud ante posibles desprendimientos sobre el camino de acceso al azud.

Día 12 de septiembre:

Se producen desprendimientos en el camino de acceso al azud que cortan el acceso. Se abre el acceso esa misma mañana mediante la pala excavadora tipo mixta.

- 13:00 horas.
  Debido a los elevados caudales que circulan por rambla Salada y la escasa capacidad de la obra de drenaje transversal en el pk 23,6 del canal Principal de Margen Izquierda, se produjo

un colapso de la obra de fábrica que forzó al Área del Trasvase a cerrar todo el canal. Ello conllevaba también el cierre de la impulsión al Canal Principal de Margen Derecha, ya que la toma del mismo cuenta con un aliviadero hacia el Canal Principal Margen Izquierda que, dada la elevada cota del embalse, rebasaba ampliamente. Es por ello que la capacidad de derivación de caudales desde el azud de Ojós de hasta 40 m³/s hacia las infraestructuras del Postrasvase quedó anulada.

Se declara el **Escenario 0** de emergencias.



Figura 8. Imagen de la rotura del canal principal de margen izquierda.

- 17:00 horas.
  Se registran lluvias en Venta del Olivo entre las 17:55 y las 19:35 en la que se concentraron 100mm/m2. Debido a la saturación del terreno por las lluvias anteriores, el hietograma prácticamente se vio replicado en el hidrograma del aforo de Blanca, inmediatamente aguas arriba del embalse, y cuya población sufrió de graves inundaciones durante la madrugada.

- 21:00 horas.
  Debido a la rapidez con la que subía el nivel del embalse, y de acuerdo con el Plan de emergencias, se intenta la maniobra de compuertas las de aliviadero. Ninguna de ellas está operativa debido a aterramientos.
  Se procedió entonces a la **declaración del Escenario 1** y a la movilización de maquinaria para el ataguiado de coronación y protección de estribos de la presa. En total se dispusieron cuatro cordones de tierras, dos de protección en los estribos derecho e izquierdo, y otros dos transversales a coronación para guiar al aliviadero las posibles aguas que sobrevertieran. De esta manera quedaban protegidos los estribos y el acceso y posible evacuación de la Central de elevación de Margen Derecha.



Figura 9. Vista del cuenco amortiguador de la presa la noche del 13 de septiembre.



Figura 10. Imagen del ataguiado de los estribos de la presa para su protección.

14 de septiembre:

- 03:40 horas.
  Se alcanza la punta y cota máxima del embalse, quedando la cota del embalse a 9cm de la coronación.
- 15:00 horas.
  Una vez alcanzada una cota segura, y sin previsiones de lluvias ni desembalses, se declaró el fin de la emergencia.



Figura 11. Imagen comparativa del vertido de los desagües de fondo un día ordinario (izquierda) con la noche del 13 de septiembre (derecha).



Figura 12. Comparativa del Vaso de toma de los desagües de fondo derechos a cota Nivel Máximo Normal (izquierda) y a las 3:00 del 13 de septiembre (derecha).



Figura 13. Imagen de la barrera antiflotantes del embalse, totalmente desbordada.

3. ESTADO DE LA PRESA

Tras el episodio, gran parte de las instalaciones de la presa quedaron muy dañadas, entre las que podemos destacar:

- Se aprecian desconchamientos en el hormigón de las pilas debido al hinchamiento previo de las armaduras, que no disponían de suficiente recubrimiento. El flujo del agua sobre las compuertas de aliviadero ha acelerado esta degradación que no es preocupante de cara a la estabilidad de la presa.
- Los desagües de fondo de margen derecha se encontraban cerrados por la rotura de la reja del vaso de toma por impactos con grandes sólidos. Se encontraban por tanto inhabilitados hasta la colocación de una nueva reja.
- Como el único elemento de desagüe al río Segura era la clapeta de aliviadero, era prácticamente imposible regular los caudales.
- Debido a la tormenta eléctrica, un transformador de la impulsión de margen derecha está fuera de servicio. También el carro interruptor del grupo 3. El grupo 1 está averiado por fugas en el cierre. Por lo que quedan dos grupos operativos con abundantes fugas en los cierres. Los achiques están cerca del 100% de su capacidad.



Figura 14. Troncos que obturaban los desagües de fondo de margen derecha.



Figura 15. Estado de la reja de los desagües de fondo derechos tras el episodio.

4. ACTUACIONES URGENTES

Para subsanar la situación en la que se encontraba el azud tras la DANA, se aprobaron las OBRAS DE EMERGENCIA DE LOS TRABAJOS DE REPARACIONES URGENTES DE LOS DAÑOS ACECIDOS EN LAS INFRAESTRUCTURAS, RÍOS Y CAUCES DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA, O.A. EN LA PROVINCIA DE MURCIA COMO CONSECUENCIA DEL EPISODIO DE LLUVIAS ACONTECIDO DEL 12 AL 15 DE SEPTIEMBRE DE 2019 EN LA CUENCA, destinando más de 3.500.000€ para la mejora de la seguridad del Azud de Ojós, destacando:

- Reparación de las compuertas de aliviadero: el aterramiento de los mismos impidió su manipulación, disminuyendo 200 veces la seguridad de la presa frente avenidas, ya que, pese a ser la avenida de los 50 años, solicitó a la presa a la de los 10.000 años.
- Cambio de los desagües de fondo de margen izquierda: su mal estado y fin de vida útil recomiendan la instalación de nueva valvulería, que permitirá disponer de un elemento de desagüe que mejore la resiliencia del azud ante futuras avenidas.
- Desatranque de la Margen Derecha: debido al arrastre de sólidos se atoraron las válvulas de mariposa de los dos desagües de fondo de la margen derecha.
- Actuaciones en la impulsión de Ojós: un microcorte debido a la tormenta hizo estallar el carro interruptor del grupo nº3 y averió uno de los dos transformadores de la subestación.



Figura 16. Retirada de la compuerta de aliviadero nº 3.



Figura 17. Instalación de la nueva reja del vaso de toma de los desagües de fondo.



Figura 18. Llegada de la nueva compuerta de aliviadero al azud de Ojós.

5. CONCLUSIONES

La capacidad destructora del episodio de lluvias del 12 al 14 de septiembre de 2019 ha sido inmensa, tal y como muestran los graves daños ocasionados en gran parte de la cuenca. Esta capacidad destructora se vio aminorada en la vega media del río Segura gracias a la labor del azud de Ojós. No obstante, conviene destacar la situación límite que se ha vivido en esta presa ya que, debido a su estado, una avenida equivalente a la de un periodo de retorno de 50 años ha solicitado a la presa a la de un periodo de retorno de 10.000 años.

Teniendo en cuenta que es la última gran presa del río Segura que debe ser capaz de aliviar los caudales de las grandes presas de cabecera, y que además es la infraestructura clave del Postrasvase ya que permite el abastecimiento de más de un millón de personas y el riego de 170.000 ha, quedó en evidencia la extrema urgencia en acometer las actuaciones antes descritas y de la dotación de recursos económicos y humanos. Pese a todas las carencias, considero este episodio como una clara muestra de cómo el capital humano puede sobreponerse a la adversidad y a la falta de inversión.



Figura 19. Personal de obra y encargado del azud de Ojós.

Y es por ello que las palabras finales no pueden ser otras que trasladar nuestra total gratitud y reconocimiento al personal de campo de la CHS, que pusieron en riesgo sus vidas para asegurar la de los demás. Especial mención merecen D. Martín Jiménez Haro y D. Braulio Galián Sáez, cuya labor aquella noche permitió sin duda la protección de muchas vidas. Por su trabajo duro, indispensable e invisible, espero que, algún día, la sociedad les brinde sus aplausos también a ellos.

NUEVOS USOS EN EL NUEVO CAUCE DEL TURIA COMPATIBLES CON SU DEFENSA DE VALENCIA FRENTE A INUNDACIONES

Francisco J. Vallés-Morán
fvalmo@hma.upv.es
https://orcid.org/0000-0001-6335-1746

Beatriz Nácher Rodríguez
beanacro@cam.upv.es
https://orcid.org/0000-0002-1976-8621

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente,
Universitat Politècnica de València, España

RESUMEN

Este trabajo analiza la posibilidad de implementar nuevos usos en el Nuevo Cauce (NC) del río Turia en Valencia. Concretamente, se trata de un uso ecológico (regeneración de hábitats; conectividad ecológica; y, mejora de la calidad del agua) y de un uso público, (generación de espacio público como elemento articulador que conecta y enlaza, y como elemento funcional que alberga usos específicos respondiendo a necesidades y derechos ciudadanos). La viabilidad de estos nuevos usos debe quedar supeditada al no compromiso de la misión fundamental del NC, la defensa de la ciudad de Valencia y sus poblaciones ribereñas frente a las inundaciones del Turia. Se trata, por tanto, de resolver un problema, el de la implementación de los nuevos usos, sujeto a restricciones (a priori) de tipo hidrológico-hidráulico. El análisis que se realiza, tras emitir el diagnóstico de la situación actual, demuestra la viabilidad de estos nuevos usos. Es decir, su implementación no compromete ni la capacidad ni el funcionamiento hidráulico del NC, ni los resguardos y estabilidad de los puentes sobre el mismo. Además, se pone de manifiesto la disponibilidad de recurso suficiente para el establecimiento del necesario caudal ecológico a partir de la reutilización de aguas depuradas en las EDAR próximas.

1. INTRODUCCIÓN

No corresponde a este texto hablar del Plan Sur, que como bien es sabido, supuso mucho más que el Nuevo Cauce, pero sí de éste, que provocó un cambio radical en la historia de la relación de Valencia con su río, el Turia.

La riada del 57 supuso un punto de inflexión, fue la que catalizó la decisión de 'sacar' al río fuera de la ciudad. Valencia había sufrido históricamente una sucesión importante de inundaciones por desbordamiento del río Turia y de alguna manera, con ésta, dijo basta. En la época, por el acontecimiento de varias de esas inundaciones en un periodo relativamente corto de tiempo (la de 1891, que es punto de referencia ya que es la primera vez que el Estado se plantea el desvío del río; la de 1949, con 49 víctimas y afección a 22 poblaciones de la comarca; y, la de 1957, inundación con 81 víctimas oficiales), había una sensación de aumento de la peligrosidad de inundaciones por parte del río, pero lo que sin duda había también, era una sensación creciente de vulnerabilidad frente a las

mismas. El riesgo era excesivo. Este hecho, fue el que condujo a la idea de que había que hacer algo, había que tomar medidas serias. Medidas de protección estructural de la ciudad (en aquella época era la única forma de pensamiento en el ámbito de defensa contra avenidas) que la salvaguardaran de este tipo de episodios hidrológicos extremos. Y creemos que, bajo ese planteamiento, y con los conocimientos, pero, sobre todo, con la técnica de la época (años 60 del siglo pasado), primó la idea de sacar el río de la ciudad frente a la que se denominó Solución Centro, que hubiera actuado sobre el cauce natural. Con esta idea de sacar el río de la ciudad, se plantearon dos soluciones, la Norte y la Sur. De entre las dos, finalmente y por motivos ya no de defensa fluvial sino de otro tipo (de proyección del crecimiento de la ciudad y urbanísticos, etc.), se impuso la Sur. En lo que al cauce del río Turia respecta, esta solución fue la que dio lugar, básicamente, al Nuevo Cauce que hoy conocemos.

En este punto, hemos de admitir que Valencia hoy, no tiene río. Por una parte, tiene un jardín lineal, los Jardines del Turia, y por otra, tiene un 'canal de evacuación de avenidas', el Nuevo Cauce, pero río, río no tiene.

No obstante, y si bien es cierto que, desde nuestro punto de vista, hoy no dejaríamos a la ciudad sin río, con los planteamientos técnicos imperantes en el campo de la ingeniería civil de la época –hidráulica en particular-, esa no fue (contextualizada) una mala solución. Es más, si dirigimos la mirada al proyecto constructivo del Nuevo Cauce (CHJ, 1968), una vez admitida que la decisión fue la de sacarlo de la ciudad (y hacerlo por el Sur), debemos admitir que técnicamente es un muy buen proyecto. La solución hidráulica es impecable. La capacidad establecida de 5000 m^3/s se consigue con un funcionamiento hidráulico 'de libro', con un régimen lento estable generalizado a lo largo de toda la canalización, con un tipo de interferencia del flujo con los puentes proyectados, de entre los posibles, el mejor, y con una desembocadura al mar que asegura su independencia hidráulica respecto de los posibles niveles de éste y que garantiza el desagüe de la capacidad antes mencionada en condiciones idóneas de funcionamiento. Es uno de los mejores proyectos que hemos tenido la oportunidad de estudiar, de revisar, y no sólo en cuanto a la hidráulica. El diseño y dimensionamiento de los puentes (11 en el Plan Sur), en todos sus elementos, desde las cimentaciones (pilotadas) hasta el equipamiento, es algo digno de ser consultado. Muchos de los elementos de este proyecto podrían ser utilizados en clase (de geotecnia, de estructuras, de procedimientos de construcción, de hormigón, …, y por supuesto de hidráulica) como ejemplo del buen hacer en la profesión.

A pesar de todo, insistimos, es verdad que sinceramente creemos que, con los parámetros actuales, hoy no sería la solución elegida. La técnica ha avanzado mucho. En la época, el conocimiento se tenía –las leyes físicas del movimiento del flujo no han cambiado- pero la técnica no era la de hoy (los cálculos se hacían 'a mano' o con regla de cálculo; calcular un logaritmo, por ejemplo, era toda una costosa labor, no digamos ya integrar numéricamente una ecuación diferencial, por ejemplo).

Por ello y dicho todo lo anterior, con la sensibilidad social actual por el medio ambiente, con el conocimiento, pero, sobre todo, con la técnica disponible hoy día, así como con la necesidad de ganar espacios de calidad para el uso ciudadano, entendemos es necesario volver la mirada a ese canal trapecial de hormigón y escollera, y rematar la actuación de entonces con la mirada de ahora. Rematarla integrando el Nuevo Cauce en el entorno, de manera que, sin comprometer su función original, pueda ser en la medida de lo posible naturalizado, y dadas sus dimensiones, pueda compatibilizarse aquella función con la de uso público por la ciudadanía. Se cerraría así, una intervención que, sin duda, estableció en su día un importante umbral de protección estructural frente a las avenidas del Turia para la ciudad de Valencia y para el resto de municipios ribereños.

En este contexto, el Ayuntamiento de Valencia, encargó a finales de 2018, a un equipo técnico, al que pertenecemos los autores de esta ponencia, el estudio y análisis técnico de la situación para establecer

la posibilidad real de llevar a cabo la idea planteada de compatibilizar el uso principal del Nuevo Cauce, de protección frente a avenidas de la ciudad de Valencia, con el uso ecológico (naturalización del cauce, creación de un cauce de aguas bajas permanente y generación de nuevos hábitats) y con el uso público (generación de espacios de calidad para el ocio y disfrute ciudadano). Los trabajos concluyeron con la redacción del informe (Rivera et al., 2018): "Estudios previos para establecer el potencial medioambiental y de uso público para la ciudad de València del Nuevo Cauce del río Túria" (en adelante, el Informe). El texto del mismo concluye con la siguiente frase: "Es una oportunidad para el área metropolitana, y supone la fusión del ayer (una catástrofe terrible), el hoy (una obra hidráulica imponente pero incompleta), y el mañana (un área metropolitana recompuesta y articulada)".

De eso se trata a nuestro juicio, de completar, de rematar la actuación de entonces con la mirada de ahora. Una tarea sin duda, ilusionante.

En este texto, el de la ponencia que nos ocupa, nos centramos en poner de manifiesto la viabilidad hidráulica de la propuesta completa de compatibilización de usos. Para ello, pretendemos dar respuesta a preguntas como:

- Estos posibles nuevos usos, ¿disminuirían la capacidad hidráulica del Nuevo Cauce?
- ¿Se vería alterado su funcionamiento hidráulico?
- ¿Disminuiría la seguridad de la obra?
- En cualquier caso, para garantizar ese cauce permanente de aguas bajas, ecológico, ¿existe recurso? ¿hay agua de calidad y en cantidad suficientes para ello?

Seguidamente damos respuesta a éstas y otras cuestiones directamente relacionadas con la ingeniería hidráulica en general, y la fluvial en particular. Para ello, antes debemos tener clara la situación actual. Es decir, debemos también responder a la pregunta de ¿cuál es su capacidad hidráulica hoy?, si se ha visto o no alterada por las actuaciones posteriores a la ejecución del Plan Sur, fundamentalmente, nuevos puentes que cruzan el Nuevo Cauce, ¿cómo funciona hidráulicamente y cómo puede verse afectado?, entre otras posibles cuestiones. Responder a todas estas preguntas es la clave de la compatibilización con los nuevos usos planteados.

2. ASPECTOS HIDRÁULICOS DE DISEÑO DEL NUEVO CAUCE (SOLUCIÓN SUR) Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El diseño del Nuevo Cauce, su capacidad y funcionamiento hidráulico y la afección que en los mismos suponen las actuaciones posteriores a su inauguración en 1969, realizadas desde entonces hasta el día de hoy, constituyen el punto de partida de las posibles intervenciones/actuaciones futuras necesarias para la integración de los tres usos, hidráulico, ecológico y público. El primero establece los a priori, las restricciones a la solución de este problema de integración y compatibilización de usos.

2.1. Geometría hidráulica y puentes en el cauce (Solución Sur)

El Nuevo Cauce del Turia tiene un desarrollo de 11.8 km, desde el Azud del Repartiment aguas arriba, en Quart de Poblet, hasta la desembocadura al mar Mediterráneo (Fig.1). En su perfil longitudinal se distinguen tres tramos (Fig.2). Los Tramos I y III tienen una pendiente geométrica longitudinal del 0.1 % (correspondiente a la pendiente de equilibrio del río en situación natural), mientras que el Tramo II intermedio, tiene una pendiente mayor, del 0.34 %.

La geométrica hidráulica de cada tramo es también diferente (Tabla 1). La sección tipo es trapecial (Fig.3), y está definida en cada caso, por el ancho en coronación, la altura de coronación y el talud de las márgenes. Los materiales que conforman lecho y márgenes también son distintos según el tramo.

Los empleados en el Nuevo Cauce son el propio material granular natural del lecho, escollera vertida de diferentes tamaños, y hormigón. Se contemplaron tres tipos distintos de escollera: Tipo 1 (peso medio de 60 kg por escollo), Tipo 2 (peso medio de 200 kg) y Tipo 3 (peso medio de 3000 kg). Adicionalmente, y en todos los casos, a pie de talud se extiende una protección de escollera de 10 m de ancho, en ambas márgenes. Se genera así una banda de protección para evitar erosiones de pie de margen.

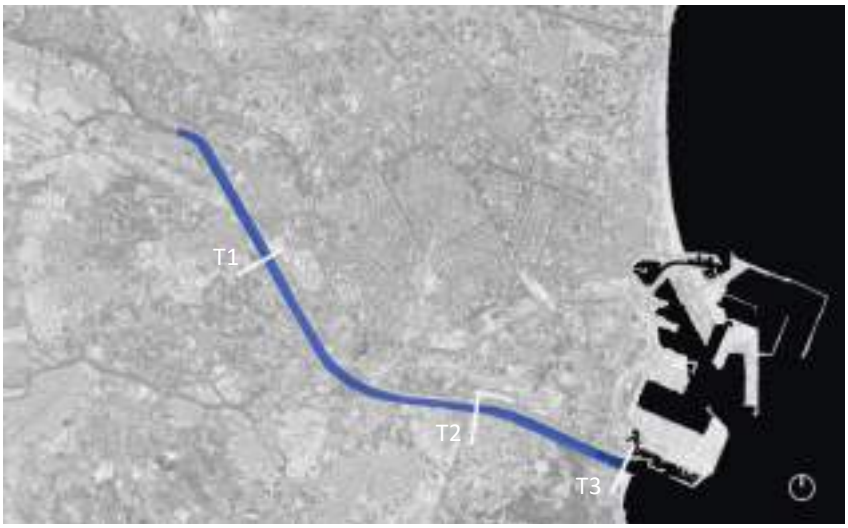


Figura 1. Nuevo Cauce del Río Turia. Planta general, con indicación de tramos, sobre ortofoto. Fuente: Rivera et al., 2018.

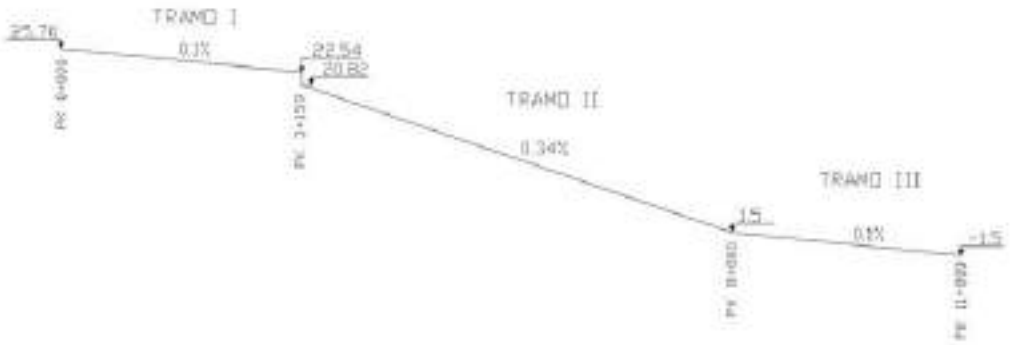


Figura 2. Nuevo Cauce del Río Turia. Perfil longitudinal, con indicación de tramos. Esquema. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011.

	TRAMO I	TRAMO II	TRAMO III
PK	0+000 a 3+159	3+200 a 8+800	8+800 a 11+800
Pendiente	0.1 %	0.34 %	0.1 %
Taludes	2H:1V	2H:1V	4H:1V
Ancho coronación	175 m	175 m	200 m
Altura coronación	8 m	8 m	Variable
Lecho	Natural	Escollera Tipo 1	Natural
Márgenes	Hormigón	Hormigón	Escollera Tipo 2

Tabla 1. Nuevo Cauce del Turia. Características geométrico-hidráulicas por tramos. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011.



Figura 3. Nuevo Cauce del Río Turia. Sección transversal. Esquema y nomenclatura. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011.

Además del mencionado Azud del Repartiment, cuya misión es derivar las aguas que vienen desde aguas arriba hacia las tomas de las acequias de riego, existen otros dos. Ese primer azud, es una estructura de hormigón con un vertedero situado a dos niveles, que desvía el flujo hacia el Nuevo Cauce en situación de crecida, cuando la lámina de agua supera un cierto umbral. Siguiendo el sentido del flujo, el segundo es el Azud Intermedio (Fig.4), situado entre los Tramos I y II, cuya misión principal es independizar el funcionamiento hidráulico de ambos tramos, para un amplio rango de caudales. La estructura, también en hormigón, está compuesta por un vertedero en pared curva, de 5.95 m de altura, seguido de un cuenco amortiguador, donde el flujo pierde la energía necesaria. La longitud del conjunto es de 41.50 m. Por último, el tercero de los azudes, es el Azud de Desembocadura. Éste, se encuentra al final de la canalización, en su extremo de aguas abajo, por debajo del nivel del mar. Se trata de un azud sumergido. Su objetivo es independizar el funcionamiento hidráulico del Nuevo Cauce del nivel del mar, de manera que el encauzamiento pueda seguir desaguando el caudal de avenida, incluso en situación de marea alta. A diferencia de los otros dos, este azud está formado por escollera Tipo 3, similar a la empleada en diques portuarios.



Figura 4. Nuevo Cauce del Río Turia. Azud Intermedio. Perfil longitudinal. Cotas. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011.

Los Tramos II y III no se encuentran separados por ninguna estructura, pero el cambio de sección y pendiente se materializa mediante una transición de 350 m de longitud (Fig.5).

El proyecto original contempló la ejecución de 11 puentes sobre el Nuevo Cauce. La relación de estructuras ejecutadas en la Solución Sur es la siguiente:

- Puente de la Ctra. a Madrid por Quart de Poblet, en el PK 0+698.26
- Puente de la Avenida de Castilla, actual A3, en el PK 2+245.4
- Puente de FF.CC. de la línea Liria-Utiel, actual línea Utiel-Cuenca, en el PK 3+533.2
- Puente de la Ctra. a Torrente por Picanya, actual V-36, en el PK 4+467.69
- Puente de FF.CC. a Villanueva de Castellón, actualmente sustituido por la línea 1 de metro en el PK 5+020
- Puente del Camino Real de Madrid, actual Ctra. CV-400, en el PK 6+370.4
- Puente de FF.CC. a la Encina, actual línea València-Alicante, en el PK 7+190.71

- Puente del nuevo acceso Sur por Silla, actual V-30, en el PK 8+629.7
- Puente de la Ctra. de En Corts, actual Ctra. a Castellar, en el PK 9+700.16
- Puente de la Autopista de la Costa, actual CV-500, en el PK 11+260.63
- Puente de la Ctra. a Casas del Campillo, actual CV-4001, en el PK 6+929.84

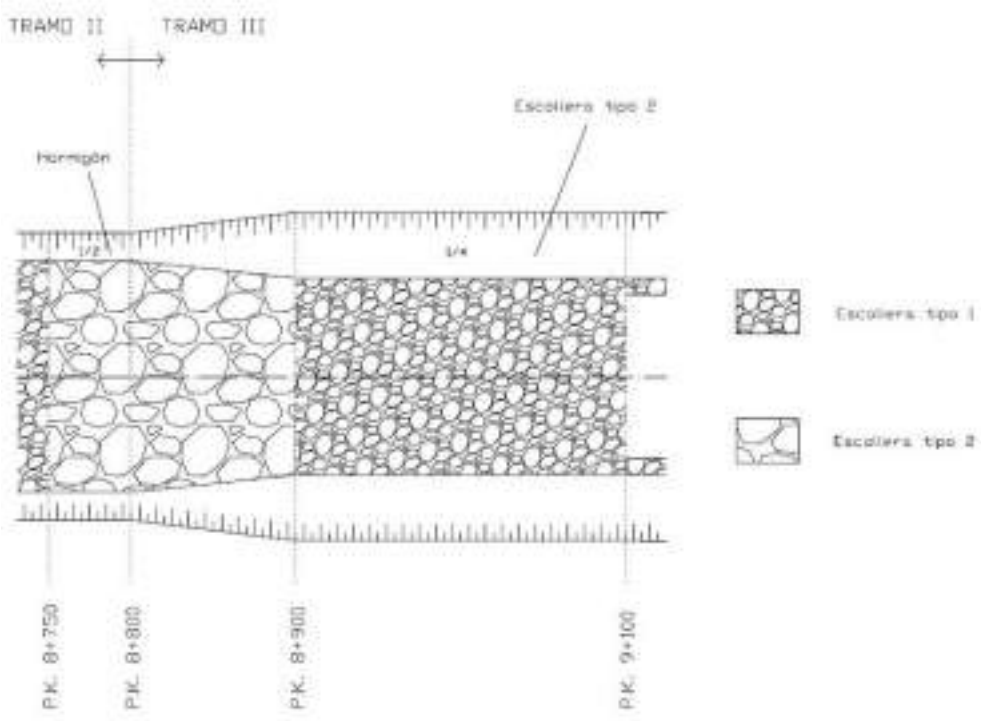


Figura 5. Nuevo Cauce del Río Turia. Transición Tramo II-Tramo III. Planta. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011.

2.2. El Nuevo Cauce. Situación Actual

La principal modificación que ha sufrido el Nuevo Cauce desde su inauguración hasta hoy, es la construcción de nuevas infraestructuras viarias y ferroviarias sobre el mismo. Los nuevos puentes construidos 'a posteriori' han sido:

- Puente de la autovía V-30, en el PK 0+396
- Puente de la línea de alta velocidad (AVE), en el PK 5+415.9
- Puente del enlace de la autovía V-31 con la V-30, en el PK 8+365.88
- Puente de la Ctra. CV-5010, en el PK 11+430.11
- Puente de la Ctra. V-30 (acceso al Puerto de València por margen derecha), en el PK 11+701.65

Además, el puente de FF.CC. a Villanueva de Castellón (PK 5+020) fue sustituido por el siguiente:

- Puente de la línea 1 de metro de València, en el PK 5+115.35

Estas estructuras suponen un obstáculo adicional al flujo, ya que sus apoyos intermedios (pilas) invaden parte de la sección transversal, estrechando además su ancho útil. El resultado directo sobre la capacidad hidráulica del cauce es, en mayor o menor medida, una disminución de la misma.

2.3. Capacidad y funcionamiento hidráulico. Diagnóstico del Nuevo Cauce en la Situación Actual

La capacidad y el funcionamiento hidráulico del Nuevo Cauce han sido analizados (Vallés-Morán et al., 2011) mediante modelación matemática, tanto para la situación original (Solución Sur) como para la situación actual. El tramo modelado, abarca toda la extensión del Nuevo Cauce (Fig.6).



Figura 6. Nuevo Cauce del Río Turia. Tramo modelado matemáticamente. Planta. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011; Rivera et al., 2018.

Así, en cuanto a la capacidad hidráulica (teniendo en cuenta obviamente la presencia de las estructuras y el peralte de la lámina libre en las curvas), el resultado obtenido para la Solución Sur, es coherente con el caudal de diseño establecido en el proyecto original (CHJ, 1968), es decir, se ha estimado en unos 5000 m^3/s. Mientras que, para la situación actual, con la introducción de 5 nuevos puentes y la modificación de uno de los preexistentes, la capacidad se ha visto ligeramente mermada. Evaluada la nueva situación, para el Nuevo Cauce hoy, supuesto un mantenimiento adecuado del mismo según su concepción y diseño (sin vegetación por tanto ni en lecho ni en márgenes), aquella se ha estimado en unos 4300 m^3/s. No obstante, esta pérdida de capacidad no es excesivamente preocupante pues, en la zona por la que desbordarían los 5000 m^3/s, Tramo III del Nuevo Cauce fundamentalmente, lo haría con una sobreelevación máxima de unos 40 cm, por lo que bastaría, por ejemplo, con un ligero recrecido de los cajeros para evitarlo.

No obstante, el funcionamiento hidráulico general del Nuevo Cauce hoy, es semejante al que originalmente tenía la Solución Sur. Los puentes alteran localmente la lámina libre y producen un incremento acumulado de calado hacia aguas arriba, pero no provocan un cambio en el tipo de régimen hidráulico de funcionamiento.

Se trata de un funcionamiento hidráulico (Fig.7), podríamos decir, teóricamente perfecto, con un régimen lento estable generalizado, perfectamente controlado y controlable. Este es el tipo de régimen deseable en un cauce de avenidas, con velocidades moderadas, escaso poder erosivo y una interacción con las estructuras insertas en el flujo, lo menos perjudicial posible. Es por ello que, junto con la capacidad, son dos de las cuestiones esenciales a respetar en la compatibilización de la funcionalidad hidráulica con los nuevos usos que puedan plantearse. Para un mayor detalle, el lector puede consultar el Informe (Rivera et al., 2018) y, sobre todo en este caso, Vallés-Morán et al., 2011.

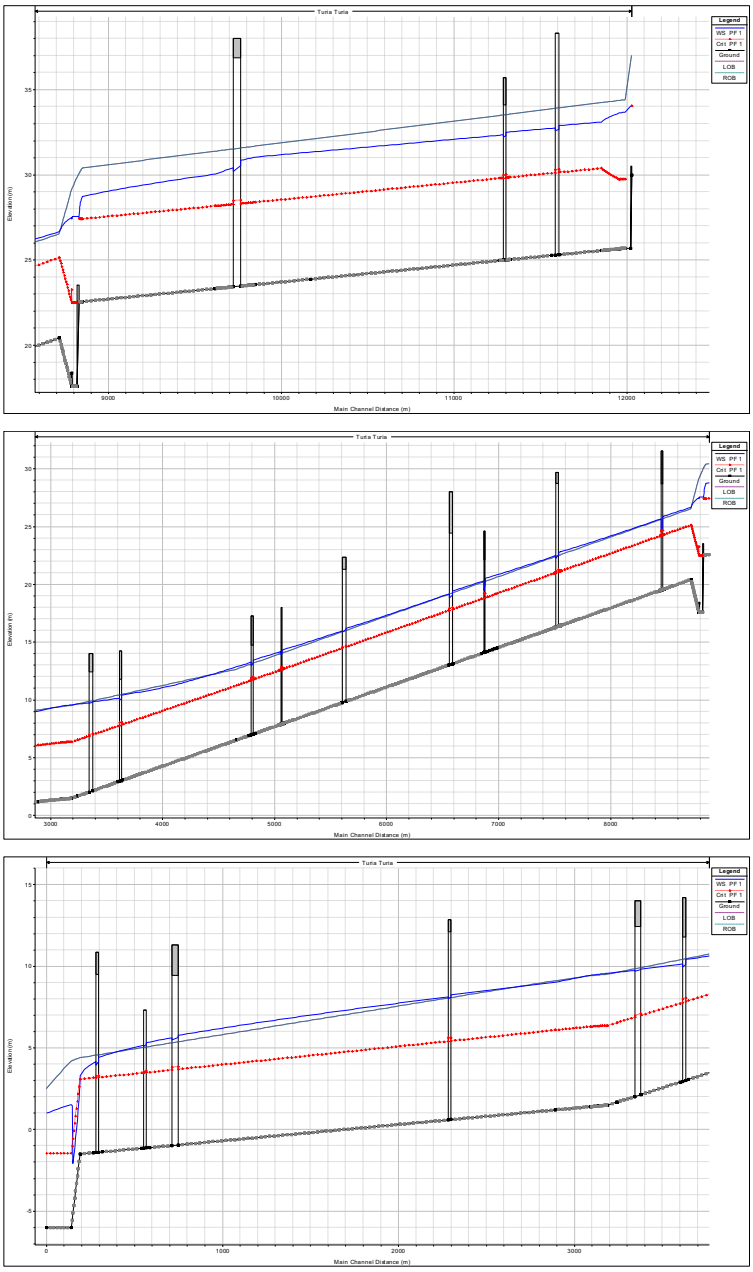


Figura 7. Nuevo Cauce del Río Turia. Situación Actual. Funcionamiento hidráulico (flujo de dcha. a izda.). Superior: Tramo I. Del Azud del Repartiment al Intermedio. Intermedia: Tramo II. Del Azud Intermedio al puente de la V31 (pista de Silla). Inferior: Tramo III y Azud de Desembocadura. Fuente: Vallés-Morán et al., 2011.

3. VIABILIDAD HIDRÁULICA DE LA INTEGRACIÓN DE NUEVOS USOS

3.1. Integración y compatibilización de usos

¿Es posible desde el punto de vista hidráulico la integración y compatibilización de los usos ecológico y público? Como ya se ha comentado, el Nuevo Cauce se construye en su día para proteger a la ciudad de Valencia frente a las crecidas del Turia. Su caudal de diseño fue de 5000 m^3/s (superior a la mayor de las puntas de la crecida de 1957). Este es su objetivo principal. Entendemos que el mismo no debe verse, en absoluto, comprometido. De manera que, los nuevos usos que se puedan plantear, ecológico y público según nuestra propuesta, deben ser compatibles con este objetivo principal, respetando concretamente, al menos:

- La capacidad hidráulica actual del cauce;
- El funcionamiento hidráulico en régimen lento estable generalizado; y
- Los resguardos bajo los puentes.

Garantizando, además, en el caso de los puentes, tanto la no puesta en peligro de sus cimentaciones como la no obstrucción de sus vanos por los nuevos elementos que puedan introducirse en el cauce (ni directamente ni tras su posible arranque y arrastre en situación de crecida extraordinaria).

En cuanto a la capacidad hidráulica del cauce, si fuera necesario, se podría revertir a la original, como se ha dicho, con pequeños recrecidos. Pero, es más, como se señala en Vallés-Morán et al. (2012), es posible un importante incremento de la misma aumentando, desde su interior, la sección hidráulica de flujo de manera compatible con todos los puentes existentes. Generando un cauce dentro del cauce. Y ello es posible sin distorsionar el funcionamiento hidráulico general del cauce ni comprometer el resguardo de las estructuras (Vallés-Morán et al., 2012). Esta solución abre un conjunto de posibilidades para poder compensar, en su caso, pequeñas o no tan pequeñas pérdidas de capacidad por otros motivos. La integración de este 'cauce dentro del cauce' para el desarrollo de los nuevos usos, obviamente, requerirá de estudios técnicos de detalle (p.e., hidrológicos de crecidas, para la actualización de la hidrología de la cuenca vertiente hoy al Nuevo Cauce; de morfología fluvial para conectar adecuadamente el Nuevo Cauce con el tramo natural de aguas arriba, y generar dentro de aquel un cauce sinuoso soporte físico del eje ambiental; hidráulicos; etc.).

En cualquier caso, y eso es lo importante en este momento, por lo expuesto, se puede afirmar que, desde el punto de vista hidráulico, es posible la integración y compatibilización de los nuevos usos propuestos con el objetivo original del Nuevo Cauce, sin que por ello tenga que verse alterado su umbral de protección estructural frente a inundaciones.

3.2. Existencia de recurso

¿Se dispone de agua en cantidad y de calidad suficientes? El único caudal que requiere de alimentación continua con garantía de servicio, es el caudal ecológico, soporte del eje ambiental, que fluiría por el cauce de aguas bajas dentro del cauce principal sinuoso –cauce dentro del cauce-, diseñado con criterios de morfología fluvial. Se estima que sería necesario un caudal regular de agua de entre 1 y 3 m^3/s (Rivera et al., 2018).

Este pequeño caudal (en términos fluviales), podría garantizarse a partir de la reutilización de aguas depuradas, tanto por cuantía como por proximidad. En efecto, cerca del Nuevo Cauce, pegadas a él en algunos casos (Fig.8), existen varias estaciones depuradoras (EDAR de Quart-Benàger y EDAR de Pinedo, p.e.) con tratamiento terciario, es decir, dotadas de una serie de procesos adicionales que permiten la reutilización que estamos planteando. Así lo aseguran fuentes de la propia EPSAR (Entidad Pública Saneamiento de Aguas Residuales), quien además cuantifica el caudal continuo que va a parar al mar a partir del volumen de agua tratada que no tiene uso comprometido en el conjunto de sus depuradoras. Este caudal continuo lo estima en unos 3 m^3/s precisamente (Rivera et al., 2018). Por otra parte, además, debemos señalar que este efluente de depuración no puede, normativamente, verterse a la Albufera de Valencia, por lo que no entra en conflicto con las necesidades hídricas del Parque Natural.



Figura 8. Situación de las Estaciones Depuradoras en relación al Nuevo Cauce. Fuente: Rivera et al., 2018.

Es decir, de nuevo la respuesta es afirmativa. Tan solo con la reutilización del agua depurada de estaciones depuradoras próximas, se dispone de agua en cantidad y calidad suficiente. Pero es que, además, en la medida que se puedan ir optimizando los regadíos de la Vega de Valencia, pueden aparecer excedentes de riego que puedan ser también aprovechables para estos menesteres, o permutables por otra fuente. En cualquier caso, la posible futura asignación adicional de recursos al mantenimiento de un régimen de caudales continuo en el curso final del Nuevo Cauce, pasaría por la adecuada asignación de los mismos en la correspondiente planificación hidrológica.

4. EJES ESPECÍFICOS. EL EJE HIDRÁULICO

Entonces, si es posible técnicamente y se dispone de agua, ¿cómo hacerlo? Para llevar a cabo la implementación de los nuevos usos, el uso ecológico o ambiental y el ciudadano o público, se plantean unos Ejes de Intervención (Rivera et al., 2018). Estos ejes son por una parte Específicos, referidos a los usos concretos a incorporar al Nuevo Cauce, y por otra, Transversales, que aluden a asuntos de esta índole, tratando concretamente temas de movilidad y accesibilidad (conexiones como concepto clave), seguridad (de las intervenciones y ciudadana, con sistemas de alerta, planes de evacuación, etc.) e infraestructuras y servicios (necesidades derivadas de los nuevos usos y adaptación local de las redes actuales para facilitar accesos, etc.).

Los ejes específicos son tres: el Eje Hidráulico, el Eje Ecológico (regeneración de hábitats; conectividad ecológica; y, mejora de la calidad del agua) y el Eje Público (espacio público como elemento articulador que conecta y enlaza, y como elemento funcional que alberga usos específicos que responden a necesidades y derechos ciudadanos).

Aunque los tres ejes específicos están interconectados y no hay una frontera clara entre ellos, sí merece la pena destacar, de manera independiente, la esencia de cada uno. En ese sentido, y siendo el eje hidráulico el que puede definir el soporte y establecer las ´reglas del juego´ desde el punto de vista del medio físico en el que implantar la vida (eje ecológico) y los usos sociales (eje público), a continuación, destacamos lo fundamental del mismo. No obstante, para profundizar más, y abordar los otros ejes, se recomienda la lectura del Informe (Rivera et al., 2018).

4.1. El Eje Hidráulico

4.1.1. Intervenciones. Ideas

La evacuación de las crecidas extraordinarias estaría garantizada por la no afección de los nuevos usos a la capacidad hidráulica ni al funcionamiento hidráulico del Nuevo Cauce.

Una de las ideas fundamentales, conectada al eje ecológico, es la de generación de un cauce menor o cauce de aguas bajas, por el que debe discurrir el caudal continuo, ecológico. Este es el cauce ligado fundamentalmente a la vida (flora y fauna), a la creación de nuevos hábitats. Pero este cauce, como ocurre en los cauces naturales, se encuentra dentro de un curso de mayor sección transversal denominado cauce principal, que es en el que tiene lugar la mayor parte de la actividad morfológica del río (Fig. 9). Habría que explorar la posibilidad de recrear este cauce (éste es el cauce dentro del Nuevo Cauce, cuya sección completa, la del Nuevo Cauce, constituye el cauce de avenidas). Se trataría de un cauce principal sinuoso, proyectado con criterios de morfología fluvial intentando de esta manera, dar continuidad a través de él, al cauce natural del río Turia dentro del gran canal del Nuevo Cauce. Así se hizo, por ejemplo, en la restauración del río Besós en Cataluña (Fig. 10). Se recoge de esta manera, una de las ideas clave planteadas en la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos del hoy Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Gobierno de España), la de recuperar su dinámica fluvial (MARM, 2010) con las restricciones que en este caso ello suponga, obviamente. Este cauce asegura una mejor conectividad ecológica, otra de las ideas básicas del eje ambiental o ecológico.

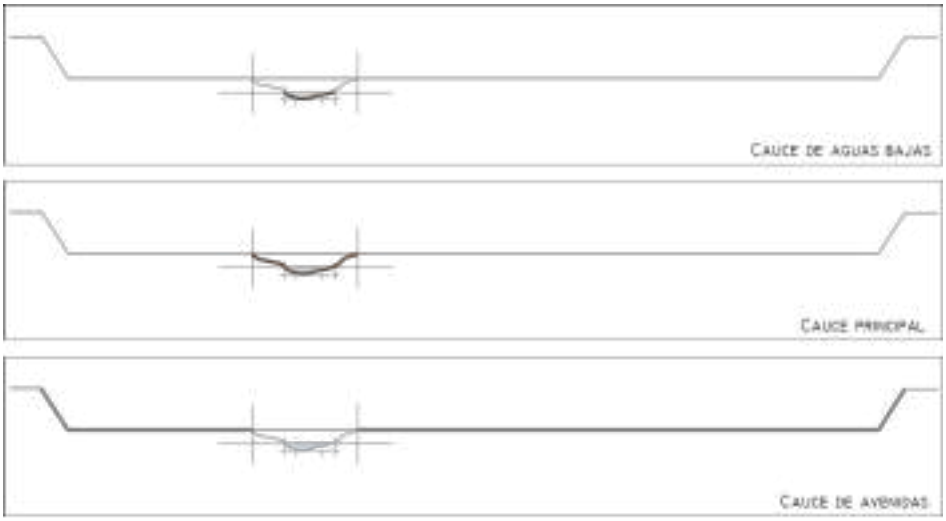


Figura 9. Cauces. Esquema conceptual. Fuente: (a partir de) Vallés-Morán et al., 2020.

Este cauce principal puede a su vez estar conectado a lagunas laterales y/o zonas de inundación controlada, que permitan laminar ese tercer caudal, el caudal de diseño de las nuevas actuaciones de uso público. Se controla de esa manera el 'daño' a las nuevas instalaciones, asumiendo, como se ha dicho, que éstas deben estar así concebidas, es decir, para que, con cierto periodo de recurrencia, puedan requerir reparación o reposición, ya sea total o parcial.

No es objeto de este texto enumerar o ejemplificar con actuaciones concretas la implantación de los nuevos usos propuestos, sino solamente –que no es poco- poner de manifiesto la posibilidad de su perfecta integración en el Nuevo Cauce del Turia de manera totalmente compatible con la que es, su función principal. Para profundizar más en la estrategia formal y funcional, así como en los posibles usos planteados, se remite al lector al Informe (Rivera et al., 2018).

No obstante, al igual que con los cauces, merece la pena clarificar el conjunto de caudales considerado.



Figura 10. Parque fluvial del río Besós. Restauración con criterios morfológicos del tramo de aguas arriba. Se observa la presencia de humedales artificiales en el lecho del cauce de avenidas (entre el cauce principal sinuoso y las márgenes del encauzamiento) como elementos de fito-depuración final de los efluentes de la depuradora situada junto al cauce (centro-derecha en la imagen). Fuente: Martín Vide, 2015.

4.1.2. Caudales

Se contemplan, por tanto, al menos tres caudales. El primero, es el caudal de avenida. Es el caudal ligado bien a la capacidad hidráulica actual del cauce o el que se decida por parte del organismo competente como umbral de protección estructural a satisfacer por el Nuevo Cauce hoy. Ninguna de las actuaciones propuestas, de compatibilización con los nuevos usos, debe tener como resultado que la capacidad del encauzamiento sea inferior a este caudal.

Como segundo caudal, se considera el caudal ecológico, el que debe ser sustento para la vida en el cauce de aguas bajas o cauce menor. La fuente de este recurso es, como se ha dicho, la reutilización de aguas depuradas. El valor de este caudal (de 1 a 3 m^3/s) es de varios órdenes de magnitud inferior al caudal de avenida, por lo que este cauce de aguas bajas, en las condiciones actuales, no supondría ninguna alteración de la capacidad.

Y un tercer caudal, el caudal de diseño de las nuevas actuaciones en el cauce, fundamentalmente asociadas al uso público, que es el que puede definir su vida útil, es decir, el que puede establecer el periodo medio de tiempo de reposición. Este caudal vendrá definido por una determinada recurrencia o periodo de retorno asociado, a determinar (podría ser de 15-20-25 años de periodo de retorno p.e., en función de los estudios oportunos, del criterio que se pueda establecer y de la naturaleza de los daños que pueda ocasionar). Por tanto, para su determinación tendrían que considerarse también criterios económicos.

Hemos indicado tres caudales, los descritos, pero probablemente deba considerarse otro caudal adicional, un cuarto caudal, el caudal de diseño del cauce principal, el cauce dentro del cauce al que aludíamos antes, en cuyo interior se albergaría a su vez el cauce de aguas bajas. Este caudal, sería el que conocemos como caudal dominante y que habría de obtenerse bien a partir de criterios hidrológicos o del correspondiente estudio morfológico, al igual que se hizo en el caso de la restauración (concreta) del tramo de aguas arriba del río Besós (Martín Vide, 2015). En la figura siguiente (Fig. 11), se muestra de manera gráfica, un esquema conceptual de los caudales considerados y su relación con los cauces antes descritos.

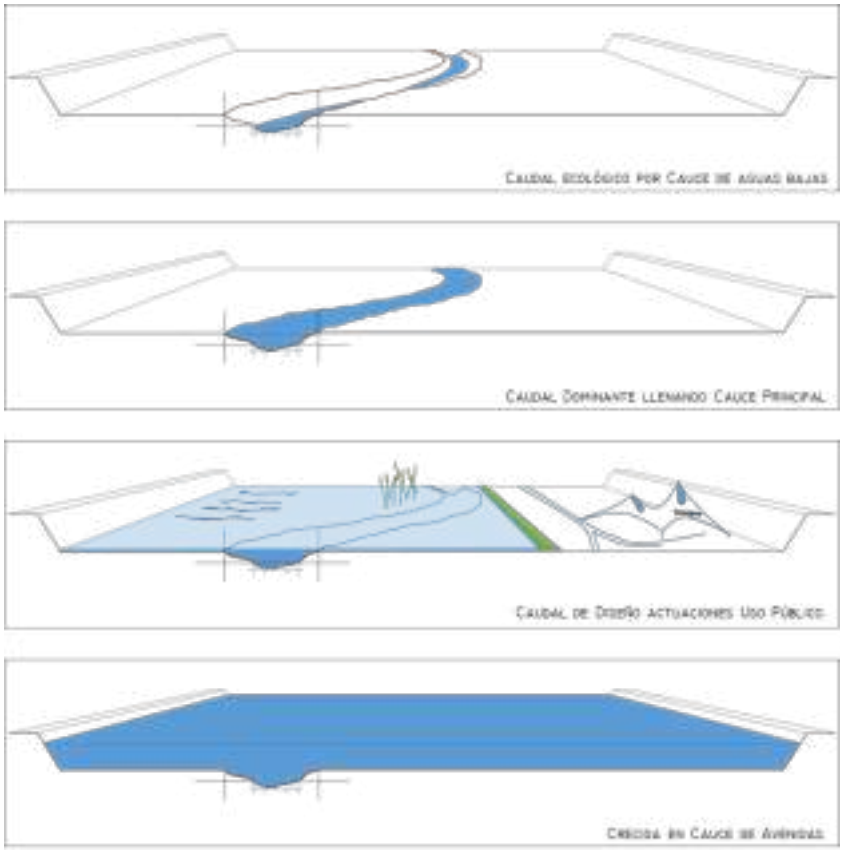


Figura 11. Eje hidráulico. Caudales considerados. Fuente: (a partir de) Vallés-Morán et al., 2020.

5. CONCLUSIÓN

Como se ha visto, la compatibilización hidráulica de los nuevos usos, es perfectamente posible, y ello, sujeta a las restricciones planteadas. En este sentido y de manera global, podemos decir, como se indica en el Informe (Rivera et al., 2018), que no solo es una intervención posible, la que plantea la integración de los tres usos (ejes específicos de actuación), sino que es también, conveniente, oportuna y viable. Eso sí, es evidente que requiere el compromiso colectivo. En este sentido, debemos entender tanto esta ponencia (y artículos anteriores) como el propio Informe como un punto de partida

para el debate por parte de todos, técnico, pero sobre todo ciudadano, en relación a lo que queremos para ese espacio de oportunidad que brinda el Nuevo Cauce.

Es un bonito sueño, pero a la vez, perfectamente realizable, convertir el Nuevo Cauce en un Nuevo Río: Llit Nou_Riu Nou.

REFERENCIAS

- CHJ, Confederación Hidrográfica del Júcar (1968). *Proyecto Sexto Reformado del de Defensa de Valencia contra las Avenidas del río Turia (Solución Sur)*. Obras Públicas, España.
- Martín Vide, J. P. (2015). Restauración del río Besòs en Barcelona. Historia y lecciones aprendidas. *Ribagua*, 2(1).
- MARM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010). *Restauración de ríos. Bases de la estrategia nacional de restauración de ríos*. Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones, Madrid.
- Rivera Herráez, R., Rivera Linares, J., Vallés Morán, F., Nácher Rodríguez, B. y Jiménez Romo, J. (2018). *Estudios previos para establecer el potencial medioambiental y de uso público para la ciudad de València del Nuevo Cauce del río Túria*. Ajuntament de València.
- Vallés Morán, F., Marco Segura, J. y Andrés Doménech, I. (2011). *Análisis y diagnóstico de la situación actual del nuevo cauce del río Turia y de la solución propuesta de supresión del azud intermedio. Informe final*. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València.
- Vallés Morán, F., Marco Segura, J. y Andrés Doménech, I. (2012). *Análisis y diagnóstico de la situación actual del nuevo cauce del río Turia y estudio de alternativas para el aumento de su capacidad hidráulica. Informe final.* Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València.
- Vallés Morán, F., Nácher Rodríguez, B., Rivera Herráez, R., Rivera Linares, J. y Jiménez Romo, J. (2020). Riesgo y oportunidad en el "Nuevo Cauce del Turia". *Agoa. Revista sobre agua, medio ambiente y territorio*, 1, 42-47. Ed. Grupo Global Omnium.

SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE. TIPOS Y OBJETIVOS

Héctor Fernández Rodríguez
Área de Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, España

Arturo Trapote Jaume
Departamento de Ingeniería Civil e Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, España

Miguel Fernández Mejuto
Área de Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante. Departamento Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, España

RESUMEN

El crecimiento de las ciudades conlleva un continuo aumento de las superficies impermeables, lo cual está generando una grave alteración del ciclo natural del agua, aumentando los problemas relacionados con el drenaje y la gestión del agua pluvial. A este fenómeno hay que añadir que los sistemas de drenaje convencionales, que consisten en transportar la escorrentía hacia cotas inferiores lo más rápidamente posible, como si de un residuo se tratara, a través de conducciones impermeables, solucionando el problema en la zona, pero no aguas abajo, están quedando obsoletos. Por estos motivos surge una nueva forma de tratar el agua pluvial, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Estos elementos son una gran variedad de sistemas que captan, tratan, e infiltran/almacenan el agua pudiendo aprovecharla para diversos usos (recarga de acuíferos, riego, recreativo…), dándole un valor al agua pluvial.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible, sustentable o perdurable nació en 1987 en el documento Nuestro Futuro Común, conocido como Informe Brundtland, fruto de los trabajos de la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas creada en 1983: "El desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Mulder, 2007). Posteriormente, la aplicación de este concepto se asumiría en el tercer principio de la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo (1992): "El derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras". Por tanto, el desarrollo sostenible supone adoptar soluciones de compromiso que aúnen avance económico con conservación medioambiental, pensando en el futuro a la hora de mejorar las condiciones actuales.

Esto supone centrar las inversiones actuales en salud, calidad y medio ambiente con la intención de asegurar la obtención de beneficios a largo plazo (Arenas Cabello, 2007). El desarrollo sostenible supone un fuerte cambio de mentalidad, pues ya no son válidos los antiguos principios de industrialización y desarrollo económico basados en la falsa idea de que los recursos naturales son ilimitados. Hoy en día, se ha constatado que las reservas de petróleo se agotan, lo cual ha forzado una fuerte inversión en energías renovables y en medidas de ahorro energético (Corregidor Sanz y

Fernández Guillén, 2004). Además, el aire está cada vez más contaminado, causando desajustes climáticos, y el agua dulce disponible no es capaz de satisfacer las demandas crecientes, haciendo necesaria la desalinización del agua de mar para su consumo. Toda acción tiene una reacción, y queda patente que el medio ambiente ha reaccionado ante la actividad humana con un agotamiento de recursos y un cambio en las condiciones ambientales que puede llegar a tener consecuencias dramáticas para la especie humana. Por todo ello, se deben tomar medidas apostando por el desarrollo sostenible en todos los campos de la actividad económica (Mulder, 2007). Así, la construcción sostenible es aquella en la que se cumplen los principios económicos, ecológicos y sociales del desarrollo sostenible, pudiendo dividirse en numerosas ramas según el tipo de obra a ejecutar. Por ejemplo, la edificación o arquitectura sostenible ofrece edificios que hacen frente a los problemas medioambientales actuales mediante un correcto diseño y construcción que permite disminuir fundamentalmente las demandas energéticas de iluminación y climatización (Arenas Cabello, 2007). Con los mismos principios, el drenaje sostenible aborda la gestión del agua de lluvia en las zonas urbanizadas.

En los últimos años, debido al desarrollo urbano, algunas redes de drenaje que forman parte del sistema de saneamiento de cualquier ciudad se han visto desbordadas en tiempo de lluvias de alta intensidad, debido a la gran cantidad de agua pluvial que reciben. Los volúmenes de estas aguas pluviales, procedentes de zonas urbanas impermeables se suman una y otra vez hasta que llegan a sobrepasar la capacidad de los colectores, tanques de tormenta y depuradoras existentes. Así, los problemas económicos más importantes causados por el agua de lluvia en las ciudades están asociados a su cantidad y a los daños que producen inundaciones, riadas, desbordamientos etc.

En el ciclo natural del agua, parte de la precipitación es interceptada por las plantas antes de tocar el suelo, el resto, una vez en el terreno, se infiltra y aumenta la humedad del mismo hasta alcanzar el máximo, produciéndose a partir de entonces acumulaciones superficiales y flujos de escorrentía superficial y subsuperficial. El agua acumulada superficialmente puede formar lagos naturales o artificiales, o bien infiltrarse recargando los acuíferos. Mientras, la escorrentía superficial de una cuenca tiene un tiempo de concentración que depende de la topografía, el tipo de suelo y la vegetación (CEDEX, 2001). Una vez concentrada en cauces, el agua corre hacia el mar oxigenándose en el trayecto, siendo parte de ella infiltrada o almacenada en superficie. De este modo, lagos, acuíferos, ríos y embalses se convierten en las principales fuentes de agua dulce para el uso humano. Destaca en el ciclo natural la presencia constante del proceso de evapotranspiración de la vegetación, que, junto con la evaporación por acción del sol, cierra el ciclo en cualquier punto devolviendo el agua a la atmósfera en forma de vapor (Revilla Cortezón et al., 1982).

Por el contrario, el ciclo del agua en las ciudades es completamente distinto. En la ciudad no hay apenas cobertura vegetal para interceptar la lluvia, sino tejados y suelos impermeables con un umbral de escorrentía muy bajo. Por lo tanto, la precipitación se transforma en su mayor parte en escorrentía superficial que se concentra rápidamente originando grandes caudales punta. Esta gran cantidad de agua es drenada a través de sumideros y alcantarillas pasando al sistema de saneamiento y evitando las acumulaciones de grandes volúmenes en los puntos más bajos de la ciudad. En comparación con las zonas naturales no urbanizadas, en las ciudades apenas se produce escorrentía subsuperficial, infiltración, almacenamiento superficial o subterráneo, evapotranspiración o evaporación. Por tanto, en una cuenca urbana el hidrograma de escorrentía de una lluvia dada es totalmente distinto al que se produce en una cuenca natural de similar área. La principal diferencia es la importante punta de caudal que se genera en muy poco tiempo debido al mayor porcentaje de superficie impermeable. La gestión de estas puntas para evitar los daños que puedan causar motiva la construcción de sistemas de drenaje de gran tamaño en las ciudades (Temprano et al., 1996).

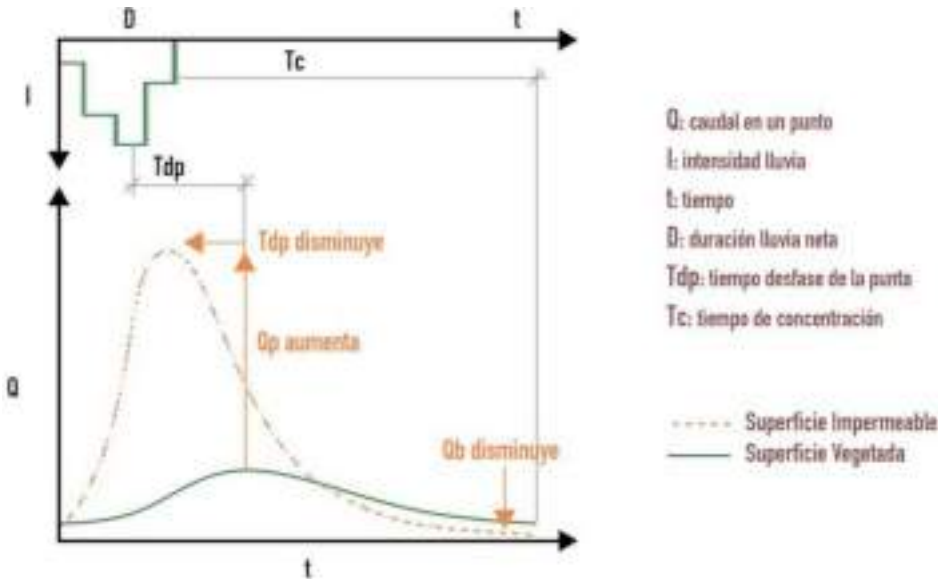


Figura 33. Hidrograma de avenida en función de la superficie de escorrentía. Fuente: modificada de Sara Perales, 2008.

Instituciones de algunos de los países más avanzados del mundo vienen reconociendo en los últimos años los múltiples beneficios derivados de afrontar la gestión del agua de lluvia desde una perspectiva alternativa a la actual, tendiendo hacia un desarrollo sostenible y en concordancia con el medio ambiente. De este modo emergen con fuerza los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), cuyo objetivo es resolver tanto los problemas de cantidad como de calidad de las escorrentías urbanas, minimizando los impactos del desarrollo urbanístico y maximizando la integración paisajística y los valores sociales y ambientales de las actuaciones programadas.

Como consecuencia de la impermeabilización del terreno, se altera el ciclo natural del agua, produciéndose mayores volúmenes de escorrentía y mayores caudales punta, además de producirse con mayor velocidad. También impide que la lluvia se infiltre en el terreno y recargue los acuíferos.

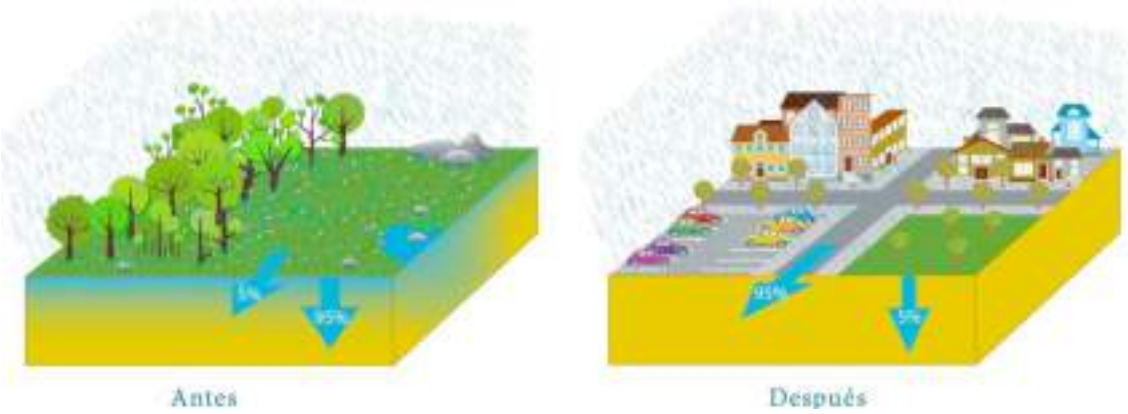


Figura 2. Disminución de la infiltración al urbanizar. Fuente: www.hidrologiasostenible.com.

A estos inconvenientes hay que añadir la contaminación del agua de escorrentía. El agua de lluvia arrastra contaminantes suspendidos en el aire (son conocidos los fenómenos como la lluvia ácida) y al encontrarse un suelo impermeable discurre por las superficies, que a menudo están contaminadas por aceites y combustibles de vehículos, restos de actividades industriales y todo tipo de sustancias, además de todo tipo de sólidos en suspensión, llegando hasta el punto de vertido con una gran carga

contaminante, lo cual dificultará el proceso de depuración en el caso de que se viertan a una E.D.A.R. o contaminará el medio receptor si se vierte directamente al medio natural.

2. TIPOS DE SUDS

2.1. Cubiertas vegetadas (Green-roofs)

Las cubiertas vegetadas, o techos verdes son sistemas multicapa con cubierta vegetal que recubren tejados y terrazas de todo tipo. Están concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico. Además, retienen contaminantes, actúan como capa de aislante térmico en el edificio y ayudan a compensar el efecto "isla de calor" que se produce en las ciudades.

Hay 3 tipos de cubiertas vegetadas:

- Extensivas: si la vegetación es baja y ocupa la totalidad de la superficie. A penas necesitan mantenimiento y sólo se puede acceder a la cubierta para realizar estas labores.
- Intensivas: son similares a un jardín convencional (pueden estar equipadas con bancos, iluminación…) suponen una carga mayor para la estructura. Son más caras que las anteriores
- Intensivas simples: la vegetación será cualquier planta tapizante (césped…) son muy ligeras.

Este sistema de drenaje, además de reducir los picos y volúmenes de escorrentía, provoca una gran reducción de los sólidos en suspensión y una moderada eliminación de los metales pesados transportados a la red de drenaje. También, cabe destacar su alto valor ecológico debido al oxígeno que produce la vegetación.

La implantación de estos sistemas puede suponer un aumento en el presupuesto de la construcción, especialmente en el apartado estructural (especialmente si las cubiertas son intensivas). También puede ser importante el coste de mantenimiento de la cubierta vegetal, por lo que se deberá tener especial cuidado en la elección de la tipología y el diseño.

En cuanto a este último, los aspectos más importantes a tener en cuenta son:

- El peso saturado del conjunto suelo-agua y la capacidad resistente de la estructura del edificio.
- Las cargas variables derivadas del mantenimiento.
- La resistencia de la membrana impermeable a la penetración de las raíces.
- Considerar la gestión del drenaje en la cubierta.
- Asegurarse de la idoneidad para ciertas plantas.

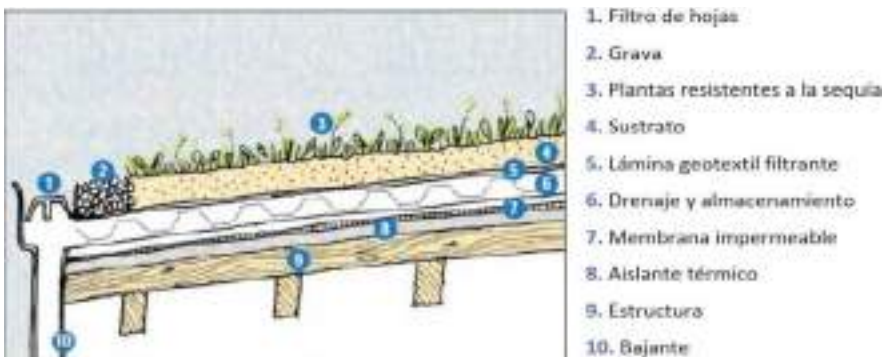


Figura 3. Esquema de una cubierta vegetada. Fuente: SFPUC, (2010). Stormwater Design Guidelines.



Figura 4. Cubierta vegetada.en Warsaw University Library, Polonia.
Fuente: www.flickr.com/photos/habitatsustentable.

2.2. Superficies Permeables (Porous / Permeable Paving)

Los pavimentos permeables son superficies que, al mismo tiempo que son aptas para el paso de peatones o de tráfico rodado, permiten al agua la filtración vertical a su través, abriendo la posibilidad a que ésta se infiltre en el terreno pudiendo recargar los acuíferos, o bien sea captada y retenida en capas subsuperficiales para su posterior reutilización o evacuación.

Con las superficies permeables, además de atenuar el caudal punta de escorrentía (ya que aumentará su coeficiente y la porosidad del terreno), también se mejora la calidad del agua debido a la eliminación de aceites, grasas, metales, sólidos en suspensión… presentes que el agua de lluvia transporta después de arrastrarlos del pavimento. Esta disminución de la escorrentía provocada también aumentará la seguridad del tráfico que circule por estas superficies en episodios de precipitación, ya que impide la formación de charcos que disminuyen la adherencia de los neumáticos con el firme.

En la actualidad se desaconseja su uso en zonas donde puedan producirse heladas que podrían provocar el agrietamiento de estos sistemas, o en firmes con alta carga de tráfico, pero están siendo investigados para poder ser utilizados en cualquier tipo de firmes en un futuro, aunque el principal factor limitante, es la capacidad estructural del suelo saturado. Pueden ser pavimentos continuos (hormigón o asfalto) o discontinuos mediante elementos modulares, y pueden ser utilizados en una gran variedad de espacios, como carreteras, aparcamientos, aceras, parques, terrazas, patios interiores...

Existen diversas tipologías, entre ellas: césped o gravas (con o sin refuerzo), bloques impermeables con juntas permeables, bloques y baldosas porosas, pavimentos continuos porosos (asfalto, hormigón, resinas, etc.).
Las capas inferiores deberán garantizar la infiltración del agua o bien acumularla y retenerla para una progresiva evacuación.

Para ser capaces de gestionar adecuadamente los episodios extraordinarios de precipitación que superan el periodo de retorno para el que han sido diseñados, es necesario que se disponga de un aliviadero perimetral que sea capaz de disipar el flujo de agua excedente, y conducirlo hacia el sistema de drenaje convencional, o hacia otro SUDS.

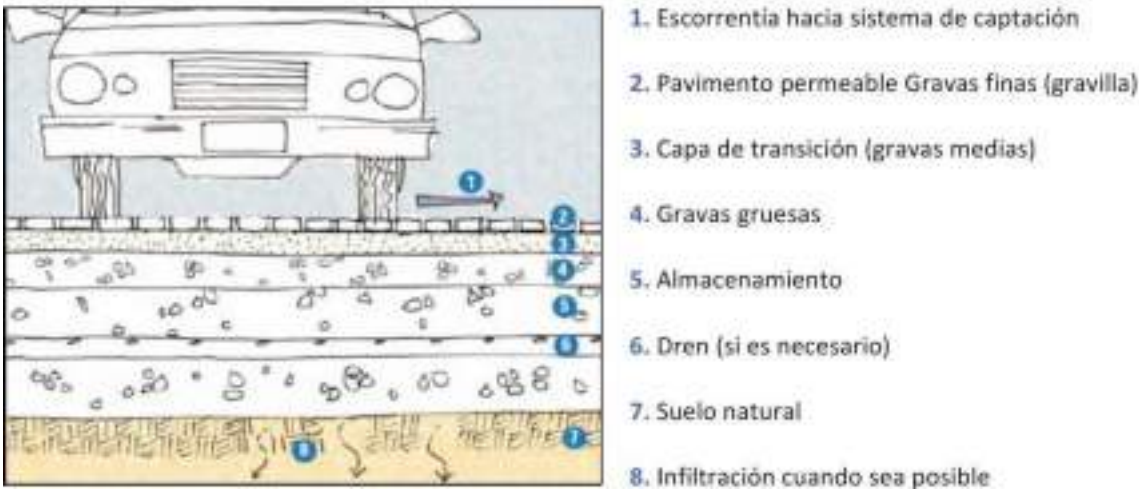


Figura 5. Esquema de un pavimento permeable. Fuente: SFPUC, (2010). Stormwater Design Guidelines.

2.3. Zonas de biorretención / Jardines de lluvia

Son sistemas que permiten un tratamiento de la escorrentía a través de la vegetación y suelos preparados o autóctonos. Si no disponen de un suelo preparado específicamente, se denominan jardines de lluvia. En estos sistemas tienen lugar procesos de interceptación de la lluvia, evapotranspiración, infiltración, eliminación de contaminantes... Reduciéndose de esta manera el volumen de la escorrentía y su contaminación.

Estos dispositivos se pueden ubicar en una gran variedad de espacios urbanos gracias a la flexibilidad que ofrece su diseño y construcción, y son especialmente útiles en la eliminación de sólidos en suspensión, y además, tienen un gran valor tanto estético como ecológico. En lo referente a la hidrología, los jardines de lluvia reducen la escorrentía generada en la zona donde se implantan gracias a la infiltración, evapotranspiración, y aumento del número de Manning de la superficie.



Figura 6. Jardín de lluvia. Fuente: drenajeurbanosostenible.org.

Estos sistemas se pueden unir a los pozos de infiltración, aumentando su efectividad en la eliminación de escorrentía.

2.4. Franjas Filtrantes (Filter Strips)

Se tratan de superficies cubiertas de vegetación, con una pendiente pequeña, que provoca un flujo

lento de la lámina de escorrentía superficial. Tienen la capacidad de tratar el agua mediante procesos físicos, químicos y biológicos, asegurando un efecto filtro gracias a la cobertura vegetal, que puede ser desde hierba hasta arbustos. Además del tratamiento de la escorrentía, que se realiza mediante el filtrado a través de la vegetación, se produce una disminución de la velocidad del agua, lo cual facilita tanto la sedimentación de otros contaminantes como la infiltración del agua.

Dada su amplitud, no son indicadas para zonas con baja disponibilidad de espacio, como pueden ser las zonas altamente urbanizadas, o en áreas de gran pendiente. Donde se utilizan principalmente es en los márgenes y/o medianas de las carreteras en los que se disponga de suficiente espacio, ya sea como sistema aislado, o como conexión a otro tipo de SUDS, sirviendo de pretratamiento.

Sus principales ventajas son la efectividad en la eliminación de sólidos en suspensión y su facilidad de adaptación a ser construidas junto a grandes áreas impermeables. Además, tienen una construcción sencilla, facilitan la evapotranspiración y la infiltración y tienen un gran valor ecológico.



Figura 7. Franja filtrante. Fuente: jsancheztapetillo.wordpress.com.

2.5. Pozos de Infiltración (Soakaways & Infiltration Trenches)

Se trata de pozos poco profundos (1 a 3 m) rellenos de material drenante (granular o sintético), a los que vierte escorrentía de superficies impermeables contiguas. Se conciben como estructuras de infiltración capaces de absorber totalmente la escorrentía generada por la tormenta de diseño para la que han sido diseñadas, e infiltrarlas hacia el subsuelo.

El único efluente del que disponen es de la infiltración hacia el subsuelo, por lo que, para su correcto funcionamiento, será necesario que dicho subsuelo tenga una alta permeabilidad, también será necesario que sea estable cuando esté saturado, ya que de lo contrario comprometería la estabilidad estructural de las cimentaciones cercanas al pozo en los episodios de lluvia.

Los pozos de infiltración son estructuras sencillas, de fácil construcción y bajos costes de mantenimiento, que además facilitan la recarga de acuíferos infiltrando un elevado caudal en relación con la superficie que ocupan, ya que apenas ocupan espacio. Pero, aun así, con unas adecuadas características del subsuelo, reducirán considerablemente tanto el caudal como la contaminación de la escorrentía. Estos sistemas tienen una gran efectividad en la eliminación de nutrientes, sedimentos, materia orgánica, trazas de metales… mejorando la hidrología urbana y la recarga de acuíferos.

Dada su fácil construcción, bajo coste de mantenimiento, y el reducido espacio que ocupan, el uso de

estos sistemas es muy recomendable en zonas de poco espacio (como pueden ser las urbanas) siempre que su suelo cumpla las condiciones requeridas (estabilidad y permeabilidad). Podrían ser utilizados con gran efectividad en gran parte de la provincia de Alicante, ya que ésta dispone de gran cantidad de superficie sobre acuíferos kársticos o fisurados (muy permeables).

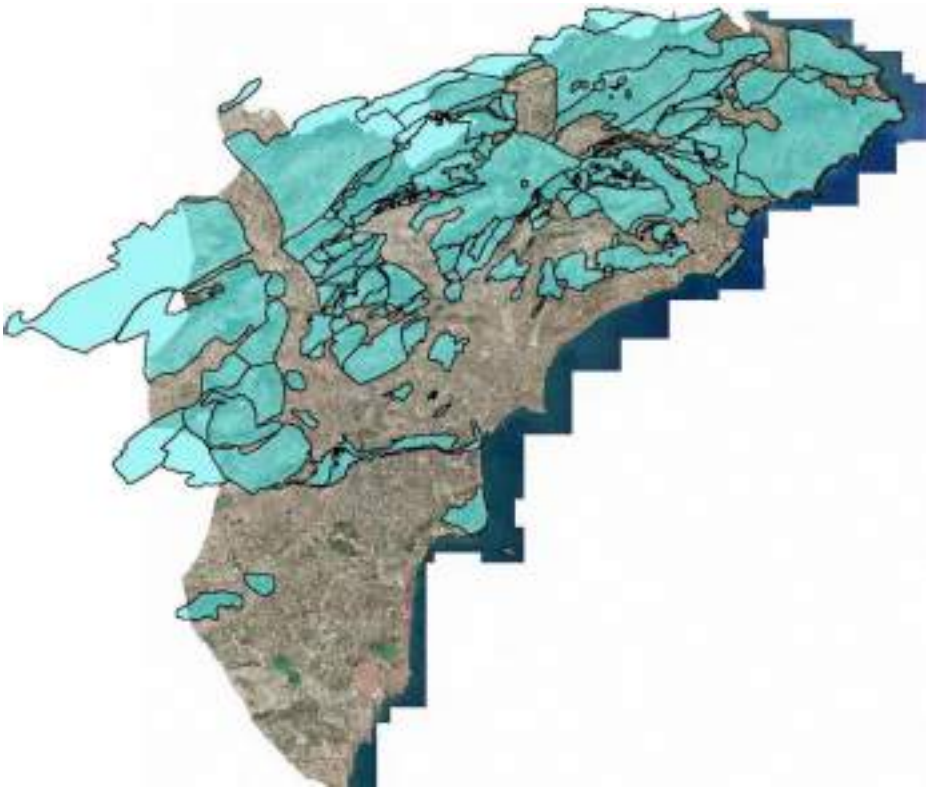


Figura 8. Mapa de acuíferos kársticos o fisurados en la provincia de Alicante. Fuente: Área de Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante.



Figura 9. Esquema de un pozo de infiltración. Fuente: SFPUC, (2010). Stormwater Design Guidelines.

2.6. Drenes Filtrantes o Franceses (Filter Drains)

Zanjas poco profundas rellenos de material filtrante (granular o sintético), con o sin conducto inferior de transporte, son concebidas para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas con el fin de transportarlas (hacia aguas abajo. Además, también reducen la contaminación, especialmente los sólidos en suspensión y los metales pesados. Su mayor aplicación es en el drenaje de las carreteras, situándose a lo largo del borde de éstas.

Son especialmente indicadas en terrenos de baja permeabilidad o donde la infiltración del agua al terreno pueda poner en peligro la estabilidad de las estructuras cercanas, ya que las zanjas conducen la escorrentía aguas abajo. Otra de las funciones de las zanjas será ralentizar el flujo del agua, de forma que disminuya la punta de caudal. Estas zanjas pueden incorporar un tubo-dren en la parte inferior que facilitará el transporte del agua.

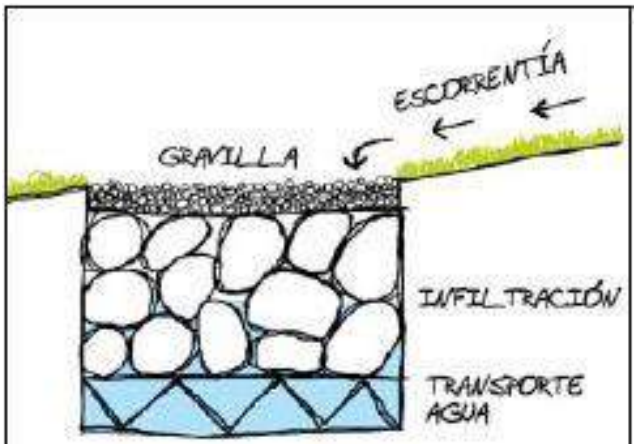


Figura 10. Esquema de un dren filtrante. Fuente: ovacen.com.

2.7. Cunetas Verdes o Vegetadas (Swales)

Estructuras lineales vegetadas, que suelen tener forma trapezoidal, de base ancha (> 0,5 m) y talud tendido (< 1V:3H) diseñadas para almacenar y transportar superficialmente la escorrentía provocada por las zonas impermeables contiguas. Deben generar bajas velocidades (< 1-2 m/s) que permitan la sedimentación de las partículas en suspensión para una eliminación eficaz de contaminantes, para ello, deberán estar densamente vegetadas. Adicionalmente pueden permitir la infiltración a capas inferiores.

Además de reducir el volumen de la escorrentía, mejoran la calidad del agua al retener las partículas en suspensión, y los metales pesados, al reducir la velocidad del flujo. Otra ventaja, es la mejora de la biodiversidad en el entorno urbano y de la calidad del aire debida a la vegetación.



Figura 11. Cuneta verde. Fuente: www.ecologyconsultancy.co.uk.

2.8. Depósitos de Infiltración (Infiltration Basins)

Depresiones del terreno, cubiertas de vegetación, diseñadas para recoger, almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas. De esta manera, se provoca la transformación de un flujo superficial en subterráneo, consiguiendo adicionalmente la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas. Son muy efectivos en la eliminación de sólidos en suspensión y metales pesados.

Estos depósitos reducen la escorrentía superficial mediante la infiltración al terreno, por lo que será necesario que éste tenga una adecuada permeabilidad. Esta infiltración les permite ser utilizados para recargar acuíferos, pero para ello la escorrentía no deberá provenir de áreas contaminadas como zonas industriales para evitar el riesgo de contaminación del acuífero. A pesar de que el terreno sea permeable, la velocidad de infiltración será muy lenta (del orden de centímetros por hora) por lo que para infiltrar una cantidad significativa de caudal será necesario disponer de una gran superficie.



Figura 12. Depósito de infiltración. Fuente: www.mortonroberts.com

2.9. Depósitos de Detención (Detention Basins)

Depósitos diseñados para almacenar temporalmente los volúmenes de escorrentía generados aguas arriba. Favorecen la sedimentación y con ello la reducción de la contaminación. Pueden emplazarse

en “zonas muertas” o ser compaginados con otros usos, como los recreacionales, en parques e instalaciones deportivas. Normalmente, estos sistemas, una vez finalizado el episodio de lluvia, liberan lentamente a la red el volumen de agua almacenado. Según su ubicación con respecto al nivel del suelo, estos depósitos pueden ser: en superficie o enterrados.

2.9.1. En superficie

Son similares a los depósitos de infiltración, pero con más profundidad, ya que en los de detención, la reducción del caudal se producirá por el almacenamiento de la escorrentía sobre la superficie, en lugar de por su infiltración al subsuelo.



Figura 13. Depósito de detención en superficie. Fuente: www.meadfleet.co.uk.

2.9.2. Enterrados

Cuando no se dispone de terrenos en superficie, o en los casos en que las condiciones del entorno no recomiendan una infraestructura a cielo abierto, estos depósitos se construyen en el subsuelo. Se fabrican con materiales diversos, siendo los de hormigón armado y los de materiales plásticos los más habituales.



Figura 14. Depósito de detención enterrado. Fuente: ovacen.com

2.10. Estanques de Retención (Retention Ponds)

Lagunas artificiales con lámina permanente de agua (de profundidad entre 1,2 y 2 m) con vegetación acuática, tanto emergente como sumergida. Están diseñadas para garantizar largos periodos de retención de la escorrentía (2-3 semanas), promoviendo la sedimentación y la absorción de nutrientes por parte de la vegetación. Se diseñan para que tengan una masa de agua permanente, y el fondo es impermeable, pero, además, contienen un volumen de almacenamiento adicional para la laminación de los caudales punta.

Estos estanques reducen considerablemente el volumen de escorrentía y son muy efectivos en la eliminación de sólidos en suspensión y metales pesados, pero requieren de mucho espacio. Los principales inconvenientes de los estanques de retención con masa de agua estancada son que pueden llegar a necesitar aporte de agua en estaciones secas, se pueden llegar a dar condiciones anaerobias, y que el agua estancada genera molestias derivadas de la presencia de malos olores e insectos (especialmente mosquitos).



Figura 15. Estanque de retención Fuente: ovacen.com

Para evitar estos inconvenientes, aparece un nuevo modelo de estanque de retención, el "parque inundable".

2.11. Parque inundable

Los parques inundables son grandes superficies que durante la mayor parte del año actúan como un parque normal, pero que durante los eventos de lluvia actúan como grandes depósitos que reciben la escorrentía provocada aguas arriba. Para ello, deberán estar a cota inferior que las superficies de las que reciba la escorrentía, y estar correctamente conectado a su red de drenaje en el caso de que de esta también reciba caudal. Para evitar la cría de mosquitos y los malos olores se deberá evitar el estancamiento del agua mediante el vaciado-llenado de esta, o con una recirculación constante. En Alicante ya se ha construido un sistema de este estilo con gran éxito (Figura 16).



Figura 16. Parque inundable La Marjal, en Playa de San Juan (Alicante).
Fuente: www.laverdad.es

2.12. Humedales (Wetlands)

Similares a los anteriores, pero de menor profundidad y con mayor densidad de vegetación emergente, aportan un gran potencial ecológico, estético, educacional y recreativo. En estos sistemas se produce la eliminación de contaminantes a través de transformaciones biológicas, absorción de las plantas, sedimentación y adsorción. Tienen los inconvenientes de los estanques de retención, derivados de la presencia agua estancada, aunque en estos sistemas se puede tratar de eliminar el problema de la presencia y cría de mosquitos mediante control biológico, ya sea reduciendo su reproducción mediante peces larvívoros instalados en el agua, o mediante la instalación de nidos para aves como las golondrinas o murciélagos que se alimentan de estos insectos.



Figura 17. Humedal. Fuente: salixrw.com

3. CONCLUSIONES

Siempre se ha intentado recoger toda el agua de lluvia, y a través de superficies impermeables como cunetas, canales, tuberías, etc. y desalojarla lo más rápido posible. Ahora, se empieza a tener en cuenta, no solo la necesidad de evacuar el agua de lluvia, sino también la necesidad de hacerlo de una manera racional, con unos caudales punta menores y una calidad adecuada.

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible tienen, por tanto, 3 objetivos:

- Disminuir la cantidad de escorrentía de lluvia en términos de volumen y caudal: de esta forma se puede solucionar la insuficiencia de capacidad hidráulica de la red de drenaje pluvial debida al crecimiento urbano no previsto en las fases de planificación de la misma, y así evitar el coste que supondría una obra para aumentar su capacidad o el hecho de tener que asumir mayores inundaciones y con más frecuencia.
- Mejorar la calidad del agua que circula por escorrentía: lo cual provocará un mejor funcionamiento de las depuradoras en el caso de que estas sean el punto de vertido, o una menor contaminación del medio natural (mar, ríos, acuíferos…).
- Generar beneficios al entorno en términos de calidad ambiental y mejora del paisaje.

REFERENCIAS

- Arenas Cabello, F. J. (2007). *El impacto ambiental en la edificación.* Madrid, España: Edisofer.
- CEDEX (2001). *Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular.*
- Ciclo Hídrico. Diputación de Alicante, Instituto Geológico y Minero de España. (2015). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Alicante.* Alicante.
- Commission, S. o. (s.f.). *www.sfwater.org*
- Corregidor Sanz, D. y Fernández Guillén, P. (2004). Energía y desarrollo sostenible. *Física y sociedad*, 16-21.
- Flickr (s.f.). *www.flickr.com/photos/habitatsustentable*
- Hidrología Sostenible (s.f.). *www.hidrologiasostenible.com*
- Meadfleet (s.f.). *https://www.meadfleet.co.uk/*
- Morton-Roberts Consulting Engineers. (s.f.). *http://www.mortonroberts.com/*
- Mulder, K. (2007). *Sustainable development for engineers.*
- Ovacen (s.f.). *https://ovacen.com/*
- Perales Momparler, S. (2008). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Ponencia Expo Zaragoza 2008.* Zaragoza.
- R.A. (2016). *https://www.laverdad.es*. Obtenido de https://www.laverdad.es/alicante/201601/03/parque-marjal-almaceno-millones-20160103003207-v.html
- Revilla Cortezón, J. (1982). Apuntes de hidrología superficial aplicada. Santander, España.
- Salixrw (s.f.). *https://www.salixrw.com/*
- Sánchez Tapetillo, J. D. (s.f.). *https://jsancheztapetillo.wordpress.com/.*
- Sudsostenible (s.f.). *http://sudsostenible.com/*
- Temprano González, J., Gabriel Cervigni, M., Suárez López, J. y Tejero Monzón, J. I. (1996). Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen. *Revista de Obras Públicas*, 143 (3352), 45-57.
- The Ecology Consultancy (s.f.). *http://www.ecologyconsultancy.co.uk/*

INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN EL DISEÑO DE COLECTORES Y EN EL RIESGO DE INUNDACIÓN

Arturo Trapote Jaume
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales
Universidad de Alicante, España
atj@ua.es
https://orcid.org/0000-0003-2084-270X

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el diseño de los colectores de aguas pluviales. Para ello, se ha estudiado el caso hipotético de un sector urbano en el que sus superficies tradicionalmente impermeables (pavimentos de aceras y calzadas, tejados y cubiertas de edificios, etc.), son sustituidos por SUDS (pavimentos permeables, cubiertas y fachadas vegetadas, zanjas y pozos filtrantes, jardines de lluvia, estanques de retención, depósitos de detención, etc.), de manera que se tienen distintos porcentajes o estados de impermeabilización del sector. Para cada estado de impermeabilización se ha calculado el caudal de escorrentía y el correspondiente diámetro del colector de drenaje. Finalmente, se ha realizado un análisis del riesgo de inundación, basado en la probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones según diferentes periodos de retorno. Los resultados obtenidos demuestran que con los SUDS disminuyen los caudales de escorrentía y, consecuentemente, se reducen los diámetros del colector de drenaje, al mismo tiempo que disminuyen los riesgos de inundación por desbordamiento del colector.

1. INTRODUCCIÓN

El efecto más característico del proceso de urbanización es la impermeabilización del suelo, que altera el ciclo hidrológico natural, especialmente el modelo de transformación de la lluvia en escorrentía. La impermeabilización del suelo incide significativamente en el balance infiltración-escorrentía, al disminuir la capacidad de infiltración del terreno y, consecuentemente, aumentar los caudales de escorrentía. Así, en un terreno natural la infiltración representa entre el 80-90% de la precipitación y la escorrentía el 10-20%, en una zona residencial (densidad media-baja) la infiltración puede suponer el 50-60% y la escorrentía el 40-50%, mientras que en un área altamente urbanizada la infiltración sería inferior al 10% y la escorrentía podría superar el 90% (GSMM, 2016).

Los denominados Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) contribuyen a paliar los efectos adversos de la urbanización, ya que permiten recuperar, al menos parcialmente, las características naturales de infiltración del suelo. A título de ejemplo, en la Fig. 1 se representan los diferentes hidrogramas de respuesta de una cuenca urbana ante un mismo aguacero, según su estado de urbanización: en la fase previa de desarrollo de la urbanización (*pre-development*, *greenfield*), tras el desarrollo urbano sin SUDS (*post-development*, *without flow attenuation*) y urbanizada con la implantación de SUDS para el control de puntas y protección frente inundaciones (*with flow attenuation*). Se puede observar que, aunque el caudal punta es el mismo tanto en la fase previa al desarrollo urbano como en la fase posterior al mismo, con los SUDS la diferencia de áreas de ambos

hidrogramas indica un incremento de volumen de la escorrentía debido a la urbanización (CIRIA, 2015).

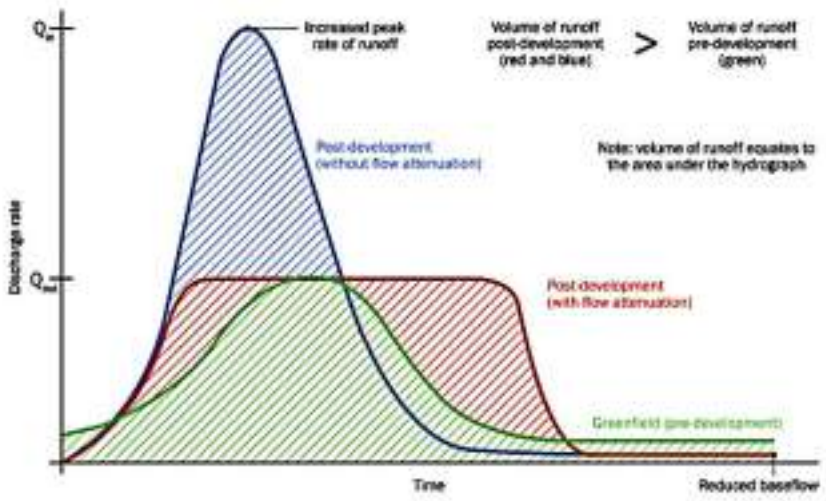


Figura 1. Ejemplo de hidrogramas de escorrentía de una cuenca en diferentes fases de desarrollo urbano. Fuente: CIRIA (2015).

Un análisis hidrológico más pormenorizado se muestra gráficamente en la Fig. 2, en donde se representa el hidrograma de respuesta de una cuenca, antes y después de ser urbanizada, ante un evento de precipitación de duración D e intensidad I variable (pluviograma de la parte superior de la figura). Como se puede observar, al impermeabilizar la cuenca, se genera un caudal pico o punta (Q_p) mucho mayor y se reduce el tiempo de desfase de la punta (T_{dp}), esto es, el tiempo de llegada al punto de control. Asimismo, la pendiente más pronunciada de la rama ascendente del hidrograma denota que la velocidad de llegada es mucho mayor. A partir de Q_p el caudal desciende bruscamente, llegando a situarse por debajo del caudal base (Q_b) que se tendría en condiciones naturales.

En la cuenca pre-urbanizada (natural), una gran parte del agua precipitada se infiltra al subsuelo mientras el resto fluye por la superficie en forma de escorrentía. En cambio, en una cuenca post-urbanizada (impermeabilizada), la mayor parte del agua de lluvia fluye por la superficie, en forma de escorrentía (Perales, 2014).

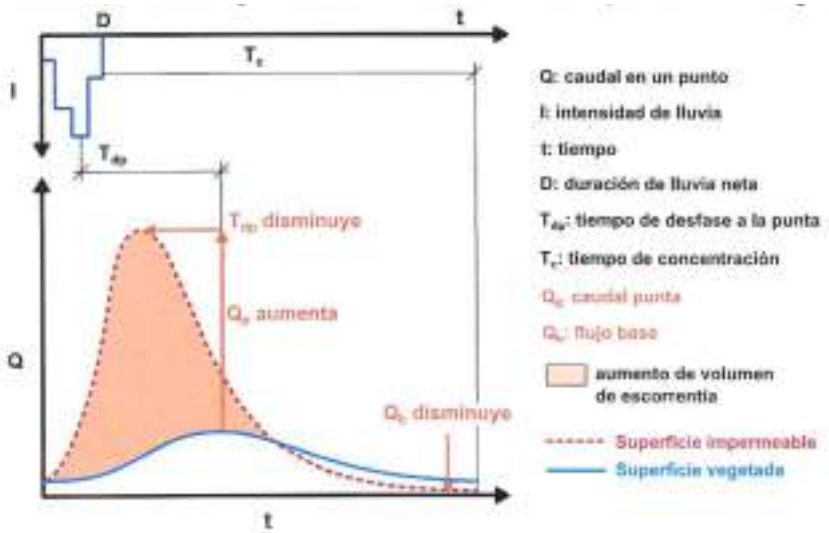


Figura 2. Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía. Fuente: Perales (2014).

A la hora de considerar la implementación de SUDS, cabría distinguir, en general, dos casos: el primero -más deseable- sería aquel en que se integrarían los SUDS en la fase de proyecto o de planeamiento urbanístico (planes generales, planes parciales, etc.), y el segundo sería el de un suelo urbano consolidado en el que, progresivamente, se fueran sustituyendo las superficies impermeables (pavimentos de calzadas y aceras, tejados y cubiertas de edificios, etc.), por determinados SUDS que permeabilizan el suelo (pavimentos permeables, cubiertas y fachadas vegetadas, pozos y zanjas filtrantes, jardines de lluvia, etc.). Lo que se pretende en ambos casos es reducir los caudales de escorrentía, difiriendo únicamente en cuanto a la etapa en que se implementarían los SUDS, esto es, antes o después de la urbanización del suelo, siendo válido el estudio que aquí se desarrolla para cualquiera de ellos.

Para realizar el estudio se ha supuesto un sector de suelo urbano (cuenca urbana), que drena sus aguas pluviales (escorrentía) a través de un colector, y se ha evaluado la influencia de la implementación de SUDS en el diseño del mismo, al ir disminuyendo el grado de impermeabilización de la cuenca y, consecuentemente, los caudales de escorrentía. Asimismo, se ha llevado a cabo un análisis del riesgo de inundación por desbordamiento del colector.

2. METODOLOGÍA

Se supone el caso de una cuenca o sector urbano, del que se conocen su área (A) y la longitud (L_c) y la pendiente (J_c) del cauce principal (alcantarilla). El sector drena sus aguas de escorrentía mediante un colector de pendiente (J), conocida, que arranca en el punto de desagüe del sector.

Se trata de obtener los caudales generados en el sector por una cierta precipitación, para diversos grados de impermeabilización y para un determinado periodo de retorno. Obtenidos los caudales, se calcularán los correspondientes diámetros del colector, lo que permitirá realizar un análisis comparativo de la influencia de los SUDS en su diseño. Posteriormente, se analizarán las implicaciones en el riesgo de inundación.
La metodología seguida comprende el cálculo sucesivo de las variables y parámetros que se indican a continuación:

1) Tiempo de concentración de la cuenca
2) Coeficientes de escorrentía
3) Intensidad de la precipitación
4) Coeficiente de uniformidad temporal de la precipitación
5) Caudales punta de escorrentía
6) Diámetros del colector de drenaje
7) Análisis del riesgo de inundación

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A los efectos del presente estudio, se consideran los siguientes datos base de partida:

- Área de la cuenca: A = 0,5 km2
- Longitud del cauce principal: Lc = 1 km
- Pendiente del cauce principal: Jc = 0,008 m/m
- Pendiente del colector de drenaje J = 0,005 m/m

3.1. Tiempo de concentración de la cuenca (t_c)

El tiempo de concentración de la cuenca (t_c) se obtiene aplicando la siguiente expresión (MF, 2016):

$$t_c = 0,3 \cdot L_c^{0,76} \cdot J_c^{-0,19} \quad (1)$$

Sustituyendo valores en la Ec. (1), se tiene:

$$t_c = 0,3 \cdot 1^{0,76} \cdot 0,008^{-0,19} = 0,75 \text{ horas} = 45 \text{ minutos}$$

3.2. Coeficientes de escorrentía (C)

El coeficiente de escorrentía (C) pueden obtenerse con la siguiente ecuación lineal (GSMM, 2016):

$$C = 0,05 + 0,009 \cdot I_{imp} \quad (2)$$

donde I_{imp} es el grado o índice de impermeabilización de la cuenca (%).

La Tabla 1 recoge los valores de C en función de I_{imp} y respectivos porcentajes de reducción de C (%rC) según las reducciones porcentuales de I_{imp} (%rI_{imp}).

I_{imp} (%)	%rI_{imp}	C	%rC
90	0,00	0,86	0,00
81	10,00	0,78	9,30
72	20,00	0,70	18,61
63	30,00	0,62	27,91
54	40,00	0,54	37,21
45	50,00	0,46	46,51
36	60,00	0,37	56,98
27	70,00	0,29	66,23

Tabla 1. Valores del coeficiente de escorrentía (C) para diferentes grados de impermeabilización de la cuenca (I_{imp}) y porcentajes de reducción respectivos (%rC y %rI_{imp}). Fuente: elaboración propia.

3.3. Intensidad de la precipitación (I)

Para determinar la intensidad de la precipitación (I) se ha fijado un periodo de retorno (T) de 5 años, típico de las redes de drenaje urbanas (CEDEX, 2007). Asimismo, se considera que para la cuenca de estudio existen curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F), según muestra la Fig. 3.

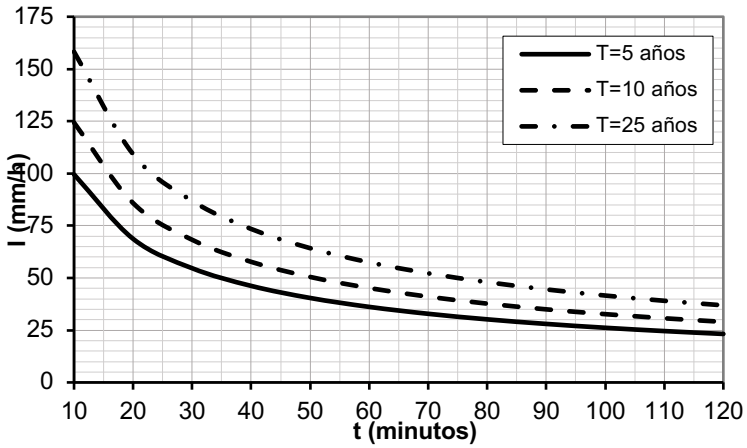


Figura 3. Curvas I-D-F (supuestas) de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Para T = 5 años y una duración del aguacero (t) igual a t_c (45 minutos), la intensidad de la precipitación es (entrando en la gráfica de la Fig. 3): I = 43 mm/h

3.4. Coeficiente de uniformidad temporal de la precipitación (K_t)

El coeficiente de uniformidad temporal de la precipitación (K_t) se determina con la siguiente expresión:

$$K_t = 1 + \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14} \qquad (3)$$

Sustituyendo valores en la Ec. (3), se tiene:

$$K_t = 1 + \frac{0,75^{1,25}}{0,75^{1,25} + 14} = 1,05$$

3.5. Caudales punta de escorrentía (Q_p)

Para calcular los caudales punta de escorrentía (Q_p) utilizamos el Método Racional Modificado (MF, 2016), según el cual el caudal punta correspondiente al período de retorno T en el punto de desagüe de la cuenca es:

$$Q_P = \frac{I \cdot C \cdot A \cdot K_t}{3,6} \qquad (4)$$

En la Tabla 2 se recogen los caudales punta (Q_p) -obtenidos sustituyendo valores en la Ec. (4): A = 0,5 km^2, K_t = 1,05, T = 5 años e I = 43 mm/h, y teniendo en cuenta la Ec (2)- para diferentes grados de impermeabilización (I_{imp}) del sector urbano de estudio (apartado 3.2), junto con las reducciones porcentuales de Q_p (%rQ_p) en función de los porcentajes de reducción de I_{imp} (%rI_{imp}).

I_{imp} (%)	Q_p (m^3/s)	%rI_{imp}	%rQ_p
90	5,4	0,00	0,00
81	4,9	10,00	9,26
72	4,4	20,00	18,52
63	3,9	30,00	27,78
54	3,4	40,00	37,04
45	2,9	50,00	46,30
36	2,3	60,00	57,41
27	1,8	70,00	66,67

Tabla 2. Valores de los caudales punta de escorrentía (Q_p) en función del grado de impermeabilización del sector (I_{imp}) y respectivas reducciones porcentuales (%rQ_p y %I_{imp}). Fuente: elaboración propia.

Obviamente, puesto que existe una relación lineal (proporcional) entre el caudal punta de escorrentía (Q_p) y el grado de impermeabilización del sector (I_{imp}), las reducciones porcentuales del caudal punta (%rQ_p) también serán proporcionales al grado de impermeabilización (%rI_{imp}). Es decir, las reducciones porcentuales del grado de impermeabilización implican idénticas reducciones porcentuales del caudal punta de escorrentía.

3.6. Diámetros del colector de drenaje (D)

Para calcular los diámetros del colector de drenaje (D) correspondientes a los caudales punta de escorrentía (Q_p) anteriormente obtenidos, emplearemos la fórmula de Manning (Chow, 1994), considerando flujo permanente y uniforme:

$$Q_P = \frac{1}{n} \cdot J^{1/2} \cdot R_h^{2/3} \cdot S \qquad (5)$$

donde, n (adimensional) es el coeficiente de rugosidad de Manning, J (m/m) la pendiente geométrica del colector, R_h (m) el radio hidráulico (relación entre el área ocupada por el agua en el colector y el perímetro mojado) y S (m^2) el área ocupada por el agua en el colector.

Aunque en la práctica los colectores se diseñan a sección parcialmente llena (75-85%), asumiremos que el colector va a sección llena ($R_h = D/4$), pero sin entrar en carga, es decir, funciona en el límite de lámina libre (a los efectos del análisis que nos ocupa esta hipótesis es válida y no desvirtúa los resultados).

Despejando D (m) de la Ec. (5), teniendo en cuenta que $R_h = D/4$ y que $S = \pi D^2/4$, se tiene:

$$D = \left(\frac{n}{0{,}31 \cdot J^{1/2}} \right)^{0{,}375} \cdot Q_P^{0{,}375} \qquad (6)$$

Considerando que el conducto es de hormigón, n = 0,013 (Chow, 1994) y que J = 0,005, la Ec. (6) puede escribirse como:

$$D = 0{,}822 \cdot Q_P^{0{,}375} \qquad (7)$$

En la Tabla 3 se recogen los diámetros del colector de drenaje (D), obtenidos mediante la Ec. (7) para cada uno de los caudales punta previamente calculados (Tabla 2), según los diferentes grados de impermeabilización (I_{imp}) del sector urbano de estudio, junto con las reducciones porcentuales de D (%rD) en función de los porcentajes de reducción de I_{imp} (%rI_{imp}).

La gráfica de la Fig. 4 muestra los valores de las reducciones porcentuales de D (%rD) en función de los porcentajes de reducción de I_{imp} (%rI_{imp}) y la curva de tendencia. Se observa que las reducciones porcentuales de D (%rD) en función de los porcentajes de reducción de I_{imp} (%rI_{imp}) siguen una curva polinómica de 2º grado creciente (curva de regresión parabólica), cuya ecuación es:

$$\%rD = 0{,}002 \cdot (\%rI_{imp})^2 + 0{,}3186 \cdot (\%rI_{imp}) + 0{,}3725 \quad (R^2 = 0{,}9946) \qquad (8)$$

I_{imp} (%)	D (m)	%rI_{imp}	%rD
90	1,55	0,00	0,00
81	1,49	10,00	3,87
72	1,43	20,00	7,74
63	1,37	30,00	11,61
54	1,30	40,00	16,13
45	1,22	50,00	21,29
36	1,13	60,00	27,10
27	1,03	70,00	33,55

Tabla 3. Valores de los diámetros del colector (D) en función del grado de impermeabilización del sector (I_{imp}) y respectivas reducciones porcentuales (%rD y %rI_{imp}). Fuente: elaboración propia.

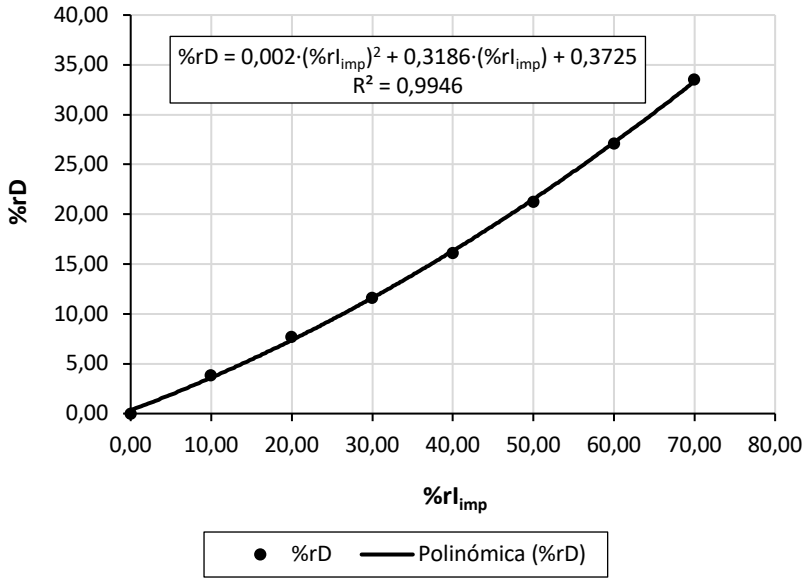


Figura 4. Valores de las reducciones porcentuales de D (%rD) en función de los porcentajes de reducción de I_{imp} (%rI_{imp}) y curva polinómica de tendencia (parábola creciente de 2º grado)

La Ec. (8) permite cuantificar técnica y económicamente la reducción porcentual del diámetro de un colector de drenaje en función de la reducción porcentual del grado de impermeabilización de un sector urbano, como consecuencia directa de la implementación de SUDS en el sector en cuestión.

3.7. Análisis del riesgo de inundación

En nuestro caso de estudio, para el cálculo de los caudales de escorrentía se ha adoptado un periodo de retorno (T) de 5 años. Como anteriormente se ha visto, para T = 5 años y una duración del aguacero (t) igual a t_c = 45 minutos, la intensidad de la precipitación es (entrando en la gráfica de la Fig. 3): I = 43 mm/h, y el correspondiente caudal punta: Q_p = 5,4 m^3/s (Tabla 2), para un grado de impermeabilización (I_{imp}) del 90%.

La probabilidad de ocurrencia de esta precipitación de 5 años de periodo de retorno es:

$$P = \frac{1}{T} = \frac{1}{5} = 0,20 = 20\%$$

Es decir, la probabilidad de que en un año cualquiera (dentro de este periodo) se iguale o supere dicha precipitación es del 20%. Por consiguiente, la probabilidad de que la capacidad hidráulica de diseño del colector sea insuficiente al menos una vez un año cualquiera es del 20% o, lo que es lo mismo, el riesgo de inundación por desbordamiento (R) es del 20%.

Analizaremos seguidamente la aplicación al caso de estudio de periodos de retorno de 10 y 25 años, deseable este último de conformidad con la Directiva de Inundaciones (obviamente, la duración del aguacero se mantiene constante e igual al tiempo de concentración: t = t_c = 45 minutos, por cuanto t_c es una característica intrínseca de la cuenca).

Para T = 10 años, la intensidad de la precipitación es (entrando en la gráfica de la Fig. 3): I = 54 mm/h. Sustituyendo valores en la Ec. (4), se obtienen los Q_p que se indican en la Tabla 4, para los diferentes grados de impermeabilización del sector (I_{imp}).

I_{imp} (%)	Q_p (m^3/s)
90	6,8
81	6,1
72	5,5
63	4,9
54	4,2
45	3,6
36	2,9
27	2,3

Tabla 4. Valores de los caudales punta (Q_p) para T = 10 años y diferentes grados de impermeabilización del sector (I_{imp}). Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la Tabla 4, que para T = 10 años y un grado de impermeabilización del sector de I_{imp} = 72%, se obtiene, prácticamente, el mismo caudal que en el caso de T = 5 años e I_{imp} = 90%.

La probabilidad de ocurrencia de esta precipitación de 10 años de periodo de retorno es:

$$P = \frac{1}{T} = \frac{1}{10} = 0{,}10 = 10\%$$

En este caso, el riesgo de inundación por desbordamiento es: R = 10%.

Por su parte, para T = 25 años, la intensidad de la precipitación es (entrando en la gráfica de la Fig. 3): I = 69 mm/h. Sustituyendo valores en la Ec. (4), se obtienen los Q_p que se indican en la Tabla 5, para los diferentes grados de impermeabilización del sector (I_{imp}).

I_{imp} (%)	Q_p (m^3/s)
90	8,7
81	7,8
72	7,0
63	6,2
54	5,4
45	4,6
36	3,8
27	2,9

Tabla 5. Valores de los caudales punta (Q_p) para T = 25 años y diferentes grados de impermeabilización del sector (I_{imp}). Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 5, para T = 25 años y un grado de impermeabilización del sector de I_{imp} = 54%, se obtiene el mismo caudal que para T = 5 años e I_{imp} = 90% y que para T = 10 años e I_{imp} = 72%.

La probabilidad de ocurrencia de esta precipitación de 25 años de periodo de retorno es:

$$P = \frac{1}{T} = \frac{1}{25} = 0,04 = 4\%$$

Por consiguiente, el riesgo de inundación por desbordamiento es: R = 4%.

En resumen, tal y como muestra la Fig. 5, el aumento del grado de impermeabilización del sector (I_{imp}) provoca un incremento del riesgo de inundación por desbordamiento del colector (R) según una curva polinómica de 2º grado (parábola), cuya ecuación es:

$$R = 0,0062 \cdot (I_{imp})^2 + 0,4444 \cdot (I_{imp}) + 10 \qquad (R^2 = 1) \qquad (8)$$

O, dicho de otra forma, la disminución del grado de impermeabilización del suelo (Iimp) reduce el riesgo de inundación por desbordamiento del colector (R), según una curva parabólica de 2º grado.

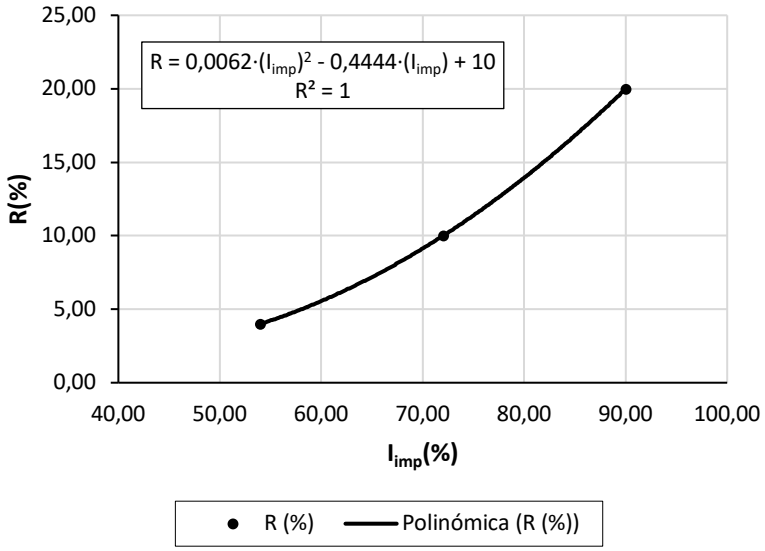


Figura 5. Aumento del riesgo de inundación (R) con el grado de impermeabilización (I_{imp}) de la cuenca (sector urbano): relación polinómica de 2º grado (curva de ajuste parabólica). Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) reducen el grado de impermeabilización del suelo, integrando técnicas tales como pavimentos permeables, cubiertas y fachadas vegetadas, pozos y zanjas de infiltración, jardines de lluvia, etc., que palían los efectos negativos de la urbanización. En el presente trabajo se ha analizado la influencia de la implementación de SUDS en el diseño del colector de drenaje de la escorrentía generada en un sector urbano y en el riesgo de inundación por el desbordamiento del referido colector.

Se ha supuesto el caso de un sector urbano con un elevado grado inicial de impermeabilización (90%) y se han aplicado sucesivas disminuciones porcentuales del mismo, calculándose los correspondientes caudales punta de escorrentía y, con éstos, los diámetros necesarios del colector. Los resultados obtenidos demuestran que las reducciones porcentuales del grado de impermeabilización del suelo implican reducciones porcentuales del diámetro del colector de drenaje según una relación polinómica de 2º grado, con la consiguiente disminución de los costes del mismo.

En cuanto al riesgo de inundación, del análisis efectuado se desprende que la reducción del grado de impermeabilización del sector implica que el riesgo de inundación se reduce también según una curva polinómica de 2º grado, de manera que si se disminuye el grado de impermeabilización del sector de un 20% (del 90 al 72%), se reduce reducir a la mitad el riesgo de inundación (del 20 al 10%), y que si se disminuye el grado de impermeabilización en un 40% (del 90 al 54%), el riesgo de inundación se reduce a la quinta parte (del 20 al 4%).

REFERENCIAS

- Atlanta Regional Commission (2016). *Georgia Stormwater Management Manual*, Vol. 2 (GSMM). Atlanta Regional Commission, Atlanta, GA, USA.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (2007). *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano*.
- Chow, V.T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill Interamericana, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) (2015). *The SUDS Manual*, London, UK.
- Ministerio de Fomento (MF) (2016). *Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras*. Boletín Oficial del Estado, 60.
- Perales, S. (2014). *Curso de Gestión Integral del agua de lluvia en entornos urbanos: Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS).* Instituto Didactia, Almería, España.
- *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, por el que se transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 2007/60 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación* (Directiva de Inundaciones). Boletín Oficial del Estado, 171.

RESEARCH ON URBAN WATERLOGGING IN CHINA

Yang Yang
School of Law, Alicante University, Spain.
Law School of Shenyang Normal University, Liaoning, China
332151yang@gmail.com

ABSTRACT

With the rapid advancement of urbanization in China, frequent occurrences of extreme thunderstorms, and urban waterlogging problems are becoming increasingly prominent, which not only caused huge economic losses, but also posed a huge threat to people's personal safety. This is closely related to the process of urban planning, urban construction, and urban management, and has become another urban disease after population congestion, traffic jams, and environmental pollution. At present, China has four main problems in the management of urban waterlogging. The first is that natural weather causes, and the heat island effect have caused the frequency of urban rainstorms to continue to increase. The second is the engineering technology. There is no virtuous cycle between urban drainage systems and urban development. As a result, heavy rains cannot be discharged, and urban water is serious; the government has serious problems with information asymmetry and fragmented city management in the legislative and law enforcement process; finally, public awareness is not high. The author's rationalization proposal is that from the perspective of the public, the role of grass-roots communities and the Internet model need to be continuously improved to improve public awareness and resilience; multi-party participation and application of multiple governance methods to form a government-led common governance of the whole society Pattern; increase social emergency legal construction, especially effective emergency plan construction; in terms of engineering technology, strengthen urban underground pipe network construction or focus on maintenance.

1. INTRODUCTION

Urbanization is the current irreversible trend in China. The problem of urban waterlogging in China has been revealed year by year since the 21st century. According to relevant data from the National Bureau of Statistics, China's urbanization rate has approached 60% in 2018. In order to maximize the use of land, the density of urban high-rise buildings and buildings has gradually increased, which has exacerbated the urban heat island effect and damaged the city's original ecological environment. Continuous heavy rains and heavy rains have repeatedly invaded, and the rainfall intensity is extremely high. Precipitation is more concentrated, which adversely affects the normal operation of urban drainage systems, and then triggers urban waterlogging, which seriously affects the orderly operation of cities.

1.1. Concepts

The first is the concept of urban waterlogging. Urban waterlogging refers to the phenomenon that continuous heavy rainfall leads to an increase in urban surface runoff, and the current cannot be discharged quickly, resulting in serious water accumulation in the city. The emergence of waterlogging in cities will cause damage to electricity and water conservancy, traffic jams, and difficulty in passage. At the same time, it caused environmental pollution, the collapse of the house, and personal injuries. The occurrence of waterlogging in a city inevitably includes the following three

factors: The first is the presence of continuous rainfall or heavy rainfall. Affected by the subtropical monsoon climate, most of China's annual rainfall time is concentrated between May and July. Many factors lead to continuous or heavy rainfall in the city, which is very likely to induce waterlogging in the city, causing great inconvenience to people's daily life. Second, low-lying topography. Urban waterlogging is affected by topography. In a city with a high terrain, the flow of water within the city is naturally smooth and will not cause waterlogging. In a low-lying city, rainy weather is encountered, and the water flow cannot be discharged smoothly, causing waterlogging in the city. Third, the urban drainage system is imperfect. When the city first emerged, there were few ground buildings, and the design of the drainage pipe network was relatively simple.

The second is the concept of eco-city. The concept of eco-city was originally an ideal city model proposed by UNESCO in 1971. The five principles of the ecological protection strategy, ecological infrastructure, living standards of residents, the protection of cultural history and the integration of nature into the city are also proposed. The concept of ecological city construction has great theoretical guiding significance for the development planning of cities in China.

Finally, the concept of sponge city. Sponge city refers to the city like a sponge that can respond to natural disasters flexibly and adapt to changes in the environment. Rainy days can absorb, infiltrate, purify and store rainwater, so that the stored rainwater can be used multiple times when needed later. The construction of a sponge city needs to change the traditional design concept of the drainage system, taking “seepage, stagnation, storage, net, use, drainage” as a guide, comprehensively considering the prevention and control measures of urban waterlogging, and achieving the goal of effective control of rainwater utilization and runoff pollution Protect existing water ecosystems, and repair damaged urban water ecosystems such as rivers and wetlands.

1.2. Basic theories

The first is the theory of polycentric governance. Polycentricity was first introduced into the public domain from the economic domain. British liberal thinker Michael Bolani expounded the concept of polycentricity in two papers, “Profit and Polycentricity” and “Possibility of Managing Social Affairs”, and Bolani discussed the profit of capitalist economy It comes from the common role of multiple centers such as consumption, production and market that use money as a medium. Each center should follow a free and spontaneous market order and be managed by different managers. Multi-center governance opposes the monopoly of the government, proposing that the government should change its role, responsibility and management methods. In the theory of multi-center governance, the government is no longer the only subject, but a subject among multiple subjects. The government plays the role of formulator of the macro framework and behavior mechanism in multiple subjects. The theory of multi-center governance requires that the government and various subjects negotiate and cooperate with each other to form a good partnership. This effectively adapts to the development trend of globalization, marketization and democratization. It is characterized by competition, cooperation, collective action, etc. as its governance mechanism.

The second is emergency management theory. Emergency management theory refers to that the government and other relevant social management organizations use planning management, science and technology and other methods within the framework of the system to make necessary response measures before, during and after emergencies. First, it is necessary to establish and improve the emergency plan system. A complete emergency response plan system should include a vertical emergency response plan from the central, provincial, municipal, district, street, and community levels to its jurisdiction. Horizontally, the relevant government departments involved in public emergencies need to have detailed department plans and special plans in their own areas and ensure the implementation of the connection with other relevant departments. Secondly, it is necessary to formulate perfect rules and regulations. In the process of emergency management, managers must

constantly improve the construction of the legal system for emergency management, improve the relevant laws and regulations of emergency management, so that the entire process of emergency management has a legal basis. Finally, establish and improve the emergency operation mechanism.

Finally, the theory of low-impact development. The theory is to use site layout and comprehensive management measures to achieve natural hydrological effects, using source reduction, remote control, and terminal treatment to achieve the goals of rainwater and pollution control, waterlogging disaster prevention, and improved rainwater utilization. Low-impact development is an environmentally friendly site development and rainwater management method that can mitigate the damage caused by urban development and construction to land, water and air. The focus of this theory is to increase the protection of natural systems and hydrological functions through the integration of site design and technical planning. It is recommended to adopt methods such as penetration and storage to minimize the degree of damage to the city.

2. PROBLEMS AND CAUSES IN WATERLOGGING AND GOVERNANCE IN CHINESE CITIES

2.1. Natural weather causes: climate change and heat island effect lead to frequent occurrence of extreme rainstorms in some parts of the world

From a physical point of view, there are two main reasons for the occurrence of rainstorms due to climate change. The first is that the warming of the climate will increase the temperature of the atmosphere and increase the amount of water vapor in the air, causing the relative increase in precipitation. The data shows that every 1 Kelvin increase in atmospheric temperature will cause an increase of 7% in the water vapor content of the atmosphere. Secondly, the warming of the climate will increase the surface temperature of the ocean, which will increase the evaporation of the sea surface, intensify the large cycle of water vapor between the ocean and the land, and promote the change of the spatial and temporal distribution of land rainfall, resulting in increased regional rainfall, and huge, strong convection Weather and short-term thunderstorms occur frequently. Overall, climate warming will lead to more frequent and intense rainstorms, floods and other natural disasters in many countries and regions.

Due to dense urban buildings, asphalt roads and cement roads have a greater heat absorption rate and smaller specific heat capacity than suburban soils and vegetation, the urban areas heat up faster and radiate to the surroundings and the atmosphere, resulting in the same time the temperature in the urban area is generally higher than the surrounding suburbs. The high-temperature urban area is surrounded by low-temperature suburbs, just like the islands in the ocean, people call this phenomenon the urban heat island effect. In the center of the urban heat island, the temperature is generally about 1 ℃ higher than that of the surrounding suburbs, and the highest temperature can reach 6 ℃. Under the action of urban heat islands, a heat island circulation from the suburbs to the city is generated near the ground.

2.2. Engineering technical reasons: the urban drainage system cannot meet the needs of urban construction

The first is the flaws in urban drainage design standards and planning. Generally, large and medium-sized cities in China are accompanied by economic development into a period of rapid development. The single-function pursuit of land utilization, different types of planning projects are not coordinated, and there is a lack of effective communication and cooperation between various professional areas construction of grey infrastructure, the traditional and old-fashioned pursuit of rapid urban water discharge, has led to the destruction of the urban hydrological cycle system.

Secondly, there are major defects in the drainage pipes of many cities in China. The diameter of the

pipeline buried underground is unreasonable, the diameter of the rainwater pipe is small, and the problem of insufficient water capacity is insufficient. In China, there are almost no drainage pipes with a diameter of more than 3 meters. In the urban construction of the last century, China introduced the Soviet city management model and underground pipe network design. The main feature of the underground pipe network design in that era was that the method was simple and easy to operate.

Finally, the reconstruction of low-lying areas is missing. Urban waterlogging easily occurs in low-lying plains. Most of these areas were built and developed in the 1990s. People's awareness of urban waterlogging is not strong. At the same time, there is a lack of relevant planning standards. After two decades of land and urban development, urban waterlogging is finally hit hard. In the process of construction and development of large and medium-sized cities, the inland river system led by the water conservancy department and the rainwater pipe system led by the city construction department are not closely connected. The design, construction and renovation of low-lying areas in the city are in line with the old urban areas. The problems of poor systematization and insignificant implementation effects are unavoidable in the treatment work.

2.3. Reasons at the legislative and enforcement level: policy formulation and implementation cannot be linked

The first is that the legislative standards for urban forced drainage and flood control are too low. Generally, according to the ability to exclude water in the area during the recurrence period, most of the recurrence period takes 3 to 5 years. Important trunk roads, important areas or areas where short-term water accumulation can cause more serious consequences are generally used for 5 to 10 years, especially important areas Can be used for 50 years or more. The first major problem is that some of the original embankment planning, design and construction standards are too low. Here is an example. In Ningbo, China, the inland water level rose to 2.4 meters, and the height of the river embankment in the urban area of Ningbo was less than 2.2 meters. This situation caused the inland river embankment to enter the city and submerge some underpasses, urban roads and residents of the overpass. Community. The second problem is that the urban drainage system planning, and design standards are low. The designed recurrence period is generally 0.5 to 3 years. Quite a number of municipal projects are designed according to the minimum requirements and can only withstand short-term heavy rainfall of 22 to 40 mm / hour.

Secondly, the government has many problems such as formalism and bureaucracy, and it has poor communication and poor coordination. At present, although the Chinese government has carried out corresponding governance work, mainly in the form of management-command, it does not pay enough attention to service orientation. Based on traditional command control management methods, it will seriously weaken the service awareness of related departments, and there is formalism and bureaucracy.

As a single service implementation subject, the government has multiple departments with different functions in charge of various service affairs. In the process of waterlogging control, the government needs to rely on collaboration between multiple departments to complete the control process. In China, institutions related to urban flood control include the Hydrological Bureau, Water Affairs Bureau, Civil Defense Office, Fire Bureau, and Health Bureau. The service subjects from top to bottom present a state of fragmentation and fragmentation, lacking a vertical and horizontal cooperation mechanism. When a disaster occurs in the city, the division of labor command system of the relevant departments is not clear, the leadership is not unified, and the division of labor among the relevant departments overlaps. When an emergency disaster occurs, there is no emergency linkage platform to form an overall joint force.

Finally, the early warning system is imperfect. The accelerated economic development increased

environmental pollution, and global warming have raised major issues for urban meteorological forecasting departments, increasing the difficulty of meteorological forecasting. Among the large and medium-sized meteorological equipment in China, the coverage of rainstorm and waterlogging monitoring stations in most cities is incomplete. The meteorological department has no way to fully grasp the data and information, nor to analyze the data with the help of technology and instruments, resulting in untimely release of early warning information. Early warning methods. The meteorological department, as the first line of defense for heavy rain and waterlogging disasters, mainly disseminates early warning information through the Internet and mobile phones, but it is difficult to receive such information in remote mountain areas. The lack of diversified emergency warning methods will cause more damage. Triggering flash floods, debris flows, and earthquakes became secondary disasters.

2.4. Citizen awareness level reasons: the public lacks scientific and crisis awareness

People have insufficient awareness of flood prevention disasters, lack of active preventive measures, the existing urban disaster prevention and emergency response system is relatively weak, and the urban flood warning system and monitoring system are incomplete. Track post-disaster reconstruction. For the monitoring of the depth of water accumulation in key parts such as urban inland water systems, road water accumulation points, low depressions, and overpasses, image and video collection monitoring is not perfect, and most projects are still in the stage of manual inspection. After the construction of monitoring facilities, the management is difficult, and there are problems in the operation and maintenance personnel and difficulties in implementing funds for the replacement and replacement of old facilities.

3. COUNTERMEASURES AGAINST URBAN WATERLOGGING

3.1. People need to raise scientific awareness to effectively increase resilience

The root cause of urban waterlogging and secondary disasters is the lack of knowledge about disaster prevention and mitigation. The government should strengthen urban infrastructure construction on hard conditions, carry out disaster prevention education in various ways, and increase the public ’s knowledge on disaster prevention and mitigation.

First of all, we can carry out irregular disaster prevention education through various channels nationwide. Secondly, schools and communities are places where people gather, and should be used as a key base for disaster prevention education to popularize safety disaster prevention education for students and community residents. Especially from the stage of compulsory education all the way to the university. Third, publicity and education work must be done at the grassroots level. Increase the funding of the grassroots level government and grassroots communities in disaster prevention. Only through continuous publicity can we establish citizens ’safety concepts, cultivate their ability to protect themselves, and create a social atmosphere for disaster prevention and mitigation. Good at using news media, mobile phone text messages, mobile phone APP client, like advertising to circulate and scroll the corresponding knowledge and small videos. In popular social software, insert disaster prevention knowledge training and information transmission work.

3.2. Multi-center participation and diversified means work together

The theory of multiple governance requires that the forces of the government, enterprises, and civil society participate in city management. China must optimize the main structural level of urban waterlogging management to provide an important guarantee for urban safety. Practical experience shows that both the central and local governments should establish a unified leadership and command urban waterlogging governance organization structure, and fully mobilize multiple subjects to carry out joint governance. In the process of waterlogging management in every city, the flood control and drought relief command headquarters will conduct unified command and dispatch. The Ministry of

Communications, the Municipal Department, and the Ministry of Communications will work closely together to make the urban waterlogging management emergency process well connected and fully communicated. Be good at making full use of the power of enterprises, institutions and private organizations to participate in flood relief. For example, streets and community systems have been established in urbanization, and community workers have close contact with residents to understand the situation and provide convenience for disaster relief.

Urban waterlogging management has a unified body for command and coordination, plus the active participation of civil organizations. In order to deal with urban storms and waterlogging, the relevant departments should unify a disaster information database managed by the leaders of the professional departments, communicate, exchange, and share information to ensure that the leading departments make timely and accurate decisions and implement the departments 'timeless disaster reduction actions. In the process of disaster management, the sharing of information must become the upper and lower levels. The communication bridge between departments, the government and the media, and the government and the people. Good information communication helps to minimize the loss of urban storms and floods. All departments can listen to the unified command and dispatch based on the information bridge, and the urban waterlogging will achieve the most effective and considerable governance goals. In the process of waterlogging control, each region should establish a unified disaster information system to provide risk analysis materials for each enterprise unit, so that enterprises can make correct investment, which can reduce disasters to a certain extent. The economic losses brought about; In addition, the disaster data should be released to the people in time, so that the people know the real information, and take timely measures to prepare for emergency response.

3.3. Legal system building to increase administrative emergency capacity

The reason why a city needs to set up an emergency linkage plan is to improve the city government's ability to deal with disasters in order to minimize the losses caused by urban disasters. The city has set up an emergency linkage early warning system so that when a disaster occurs, all departments can follow the rules and carry out emergency linkage based on cases. The establishment of the emergency linkage system includes a series of policies and principles in emergency work, as well as emergency early warning, emergency disaster treatment plan, emergency staff and responsibility allocation, emergency resource linkage and recovery after heavy rain and waterlogging. The storm waterlogging emergency linkage plan needs to be written at different levels, that is, the general objectives of the urban emergency linkage management should be divided into sub-goals, and the unit goals should be set under the sub-goals, and each goal must be written with a detailed plan. For the rainstorm waterlogging emergency linkage system, each level of government department must set a goal and write a plan for each unit. For a waterlogged city, a special plan should be made according to the city's waterlogged points. The emergency response plan for the unit and the emergency response plan for the flood-prone point are detailed and operable. In addition, a good plan must first be unified, that is, the goals of the specific plan and the overall plan must be unified; second, it must be flexible, and it can flexibly deal with unexpected situations other than the plan; third, it must be specific, the plan It must be specific and feasible. The plan in the plan must be as objective as possible without subjective speculation.

3.4. More attention to equipment management and maintenance

To improve the planning system for flood control and drainage, we must consider the construction of sponge cities, use administrative licensing to implement ecological space management and control, effectively protect and maintain ecological land in ecologically protected areas and sensitive areas, and ensure that the forest plates and hills in the city are not affected by The impact of urban expansion land, protect the normal operation of forest parks and natural landscapes, and gradually increase the capacity of urban green land to absorb and store rainwater.

The rainwater pipe network is an important part of the comprehensive management of urban rainwater. Improving the urban drainage system has an important role in solving the urban waterlogging problem. In conjunction with the implementation of urban renewal and new road reconstruction projects, the rainwater pipe network that does not meet the standards is gradually transformed and the drainage of the network is improved Ability to expand the coverage of the pipe network. Strengthen the supervision of the construction site, prevent the mud and sand from being discharged, and do the daily maintenance work of the rainwater pipe network to ensure the good operation of the rainwater pipe network. Assessing the health of the pipeline network, the application of high-tech technologies such as trenchless repair and flow monitoring and hydraulic models can further improve the management and maintenance efficiency of the drainage pipeline network, and provide some reliable methods for the diagnosis, analysis and evaluation of the drainage pipeline network. Strengthen the inspection of drainage pipelines, mainly referring to manual daily inspections and irregular technical inspections. During the inspection of the drainage pipeline, it is necessary to carefully check the manhole cover and well seat of the drainage channel, to ensure that there is a manhole cover at the drainage port, and no damage to the facility can occur.

4. CONCLUSION

In the cities and regions where we live, they have their own life systems. In the 21st century, we must first learn to respect, respect laws, and respect nature, and we must be free from the idea of "transforming nature". Using our scientific and technological means, in this real world with frequent risks, increase scientific predictions as much as possible, reduce man-made risks and man-made damages as much as possible, and continue to do so, when there is a risk, there may be opportunity to save more lives and values.

REFERENCES

- Wendong Zhao & Hongjuan Kang (2011). Looking the development trend of drainage planning from the frequent occurrence of urban waterlogging disasters. *City Planning*, 3, 45-50.
- Ben Su (2012). Cultivation and Reference of Public Safety Consciousness in Developed Countries. *Journal of Party and Administrative Cadres*, 2,18-19.
- Henghua Hu (2015). Planning and Response to Urban Rainstorm and Waterlogging Based on Fine Model. *Urban Development Research*, 6, 4-10.
- Yeping Xu & Chen Xiang (2015). Analysis of the planning method for curing the waterlogging plight of cities: development and prospect of waterlogging prevention and control planning under the urban planning system. *Urban Planning*, 22.
- Zhiyong Xie & Jianrao Pei (2006). Analysis of the Legal Nature and Relief of Damage Compensation for Public Facilities in China. *Journal of Southwest University of Political Science and Law*, 4.
- Guoquan Chen & Wang Qin (2017). The Rule of Law and Responsible Government in the Modern Transformation of Market Economy. *Journal of Public Administration*, 4.
- Jianrong Huang & Liang Ying (2004). Building an Accountable Government: The Only Way for China's Government to Innovate, *Social Science*, 9.
- Sicheng Zhu & Xiyan Ren (2011). Thinking about Urban Waterlogging. *Administrative Reform*, 11, 9-13.
- Shijun Ma & Rusong Wang (1984). Social-Economic-Natural Composite Ecosystem. *Journal of Ecology*, 4, 1-9.
- Xiyan Ren, Yingxia Xie & Wang Wenjia (2012). Reconstruction in the transformation of urban development: strategic thinking on urban waterlogging prevention. *Urban Development Research*, 6, 71-77.
- Jingchao Han, Shijing Yu & Yongpeng Lu (2014). Study on the management measures of urban

drainage and waterlogging. *Urban road bridges and flood protection*, 11, 22-25.
- Xing Guoping, Sun Yan, Dong Yan & Ji Min (2014). Transformation and Enlightenment of Urban Waterlogging Prevention Measures-From Exhaust to Storage to Infiltration. *Journal of Safety and Environment*, 5, 141-145.
- Hu Bo, Ding Yiyi, He Lide, Gu Sinan, Huang Helou, Zhao Wujie, Wang Wujun & Xi Fangping (2014). Risk Division of Storm and Flood Disasters in Ningbo Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Heavy rain disaster*, 4, 38-42.
- Lu Yun (2011). Enlightenment from foreign metropolitan drainage systems. China Construction, 8, 43-45.
- Ren Xiyan, Xie Yingxia & Zhu Sicheng (2012). Reconstruction in the transformation of urban development: strategic thinking on urban waterlogging prevention. *Urban Development Research*, 6, 71-77.
- Zhang Fang (2018). Research on flood prevention and drainage measures in Ningbo. *Zhejiang Water Conservancy Technology*, 6, 19-21.
- Guangsheng Zhou (2016). The prevention and control of urban waterlogging needs to fully predict the impact of climate change. *Ecological Science*, 16, 61-64.
- Lili Ni, Zeng Jian & Zhang Yanping (2015). Planning and Response to Urban Rainstorm and Waterlogging Based on Fine Model. *Urban Development Research*, 6, 4-10.
- Yan Chen (2013). Analysis of the planning method for curing the waterlogging plight of cities: development and prospect of waterlogging prevention and control planning under the urban planning system. *Urban Planning*, 22, 15-17.

GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA

José Alberto Redondo Orts
Universidad de Alicante
jaro@alu.ua.es

M. Inmaculada López Ortiz
Departamento de Análisis Económico Aplicado, Universidad de Alicante
iortiz@ua.es

RESUMEN

Históricamente, en el sureste español, y en concreto la Demarcación Hidrográfica del Segura, se han producido innumerables episodios de lluvias torrenciales que ocasionan graves inundaciones. Es por ello que, desde hace más de un siglo, en la planificación de grandes obras hidráulicas se ha tenido muy presente el objetivo de poder contener estas situaciones, y minimizar sus efectos devastadores. Actualmente sigue siendo una asignatura pendiente, ya que, a pesar de haber logrado grandes avances, siguen produciéndose situaciones incontrolables, prueba de ello han sido las recientes inundaciones sufridas en el episodio de DANA del año 2019, que acarrearon graves consecuencias. A continuación, se presenta un resumen de la cronología que ha seguido la planificación hidrológica y su situación actual, donde queda de manifiesto que sin el necesario esfuerzo inversor no podrán ejecutarse las infraestructuras necesarias para la contención de este fenómeno que, como consecuencia del cambio climático, puede ver incrementada su frecuencia.

1. ANTECEDENTES

Los fenómenos de precipitación extremos se producen cada vez con mayor frecuencia en el Sureste Español, y en concreto en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Estas lluvias torrenciales incrementan de manera exponencial los caudales de ríos y ramblas, lo que produce inundaciones de graves consecuencias económicas, y sobre todo humanas.

Son muchas las administraciones públicas (estatales, autonómicas, locales) implicadas en la gestión de este riesgo, lo que genera la imperiosa necesidad de coordinación y cooperación, tanto en materia de prevención como en la ejecución de los programas de actuación.

Es por ello, que el 23 de octubre de 2007 se aprobó la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (incorporado a nuestro ordenamiento jurídico mediante el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión del riesgo de inundación).

En el ámbito europeo, ya se ha había establecido previamente un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, mediante la aprobación de la Directiva 2000/60/CE (Directiva Marco del Agua, en adelante DMA). No obstante, la reducción del riesgo de inundación no es uno de los objetivos principales de esta Directiva, que tampoco tiene en cuenta los futuros cambios del riesgo

de inundación que se derivarán del cambio climático.

Por lo tanto, la Directiva 2007/60/CE tiene como propósito generar nuevos instrumentos a nivel comunitario para reducir las posibles consecuencias de las inundaciones mediante la gestión del riesgo, apoyada en cartografía de peligrosidad y de riesgo (RD 903/2010), generando los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI en adelante) en coordinación con los Planes Hidrológicos de Cuenca.

En la Demacración del Segura, la consideración de las inundaciones en la planificación de obras hidráulicas se remonta a finales del siglo XIX con el "Anteproyecto de Obras contra las inundaciones en el Valle del Segura" (redactado por Ramón García Hernández y Luís Gaztelu Maritorena en 1886), lo que sitúa a esta demarcación como pionera en los intentos de control de esta problemática.

En el ámbito nacional, y ya en el siglo XX, la aprobación del Plan Nacional de Obras Hidráulicas (en 1902, también conocido como el Plan Gasset), recogía actuaciones que tenían como objetivo el aumento de la regulación hidráulica y la defensa contra inundaciones, cuya vigencia duraría hasta 1926, año en el que se creó la Confederación Sindical Hidrográfica del Segura. Posteriormente, con la aprobación del Plan Nacional de Obras Hidráulicas en 1933, se incluyen actuaciones en materia de defensa contra avenidas no ejecutadas del Anteproyecto de 1986, así como nuevas propuestas.

No obstante, a pesar de los esfuerzos en materia de defensa contra avenidas e inundaciones, estos fenómenos continuaron generando graves consecuencias a lo largo del siglo XX en el sureste español. Es por ello que, tras las graves inundaciones ocurridas en 1987 se aprobara el RD-Ley 4/1987, de 13 de noviembre, por el que se adoptan medidas urgentes para reparar los daños causados por las inundaciones ocurridas en la Comunidad Valenciana y en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, donde se autorizaba la ejecución del Plan de Defensas en la cuenca del Segura (1977).

La filosofía de estas obras se basaba en el hecho de que la adecuación del cauce del río Segura para absorber los 1.500 m^3/s que preveía el Plan del 77, y supondría una reordenación del territorio de tal magnitud que su logro sería improbable y, en todo caso, a muy largo plazo de tiempo y con unos costos económicos y sociales prohibitivos. Por ello, se modifica este criterio y, tras estimar en 400 m^3/s el caudal máximo que puede circular por el río a su paso por ciudades como Orihuela y Rojales sin causar trastornos en otras poblaciones, el objetivo pasa a ser que no fluyan al río Segura avenidas que produzcan un caudal superior al citado para un período de retorno de 50 años.

Posteriormente, en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura de 1998 se destacaba la importancia de completar la protección estructural con sistemas de información y predicción, como el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica), y de prevención como a de repoblación y corrección hidrológico-forestal. En el citado PHCS 1998 se estableció el Programa nº 8 de infraestructuras y sistemas de gestión con una serie de actuaciones con un volumen de inversión de 388 M€.

Adicionalmente a estos planes y proyectos, la protección frente a las inundaciones ha contado con el respaldo de otra legislación nacional, como el texto refundido de la Ley de Aguas (RD Legislativo 1/2001, de 20 de julio), la Ley del Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001, de 5 de julio, modificada por la Ley 11/2005, de 22 de junio), así como la Ley de Protección Civil (Ley 2/1985, de 21 de enero), que se desarrolla mediante la Norma Básica de Protección Civil, aprobada por el RD 407/1992, de 24 de abril.

Finalmente, el PRGI y el plan hidrológico de la demarcación del Segura (en adelante PHDS) son elementos de una gestión integrada de la cuenca, y de ahí la importancia de la coordinación entre

ambos procesos, guiados por la Directiva de Inundaciones (Directiva 2007/60/CE, transposición al ordenamiento jurídico español por el RD 903/2010) y la DMA (Directiva 2000/60/CE, transpuesta por la Ley 62/2003) respectivamente. La planificación hidrológica y la de gestión del riesgo de inundación son en esencia herramientas de gestión adaptativa, que se evalúan y revisan con una periodicidad de 6 años. Ambos planes, además, se someten a un proceso de evaluación ambiental estratégica en cada ciclo.

Tal y como se indica en el artículo 1 del Reglamento de Planificación Hidrológica (en adelante RPH) aprobado por el RD 907/2007 de 6 de julio, la planificación hidrológica tiene como principales objetivos alcanzar el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico y de las aguas objeto del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

Para conseguir estos objetivos, la planificación hidrológica se guiará por criterios de sostenibilidad en el uso del agua mediante la gestión integrada y la protección a largo plazo de los recursos hídricos, prevención del deterioro del estado de las aguas, protección y mejora del medio acuático y de los ecosistemas acuáticos y reducción de la contaminación. Finalmente, también se indica que la planificación hidrológica contribuirá a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

A continuación, se recogen los elementos más destacables en materia de inundaciones tanto del primer ciclo de planificación 2009-2015 como del vigente segundo ciclo de planificación 2015-2021, así como del proceso actual de revisión de los documentos de cara al tercer ciclo de planificación 2021-2027.

2. CICLO DE PLANIFICACIÓN 2009-2015

En la primera fase del proceso de planificación 2009-2015 se aprobaron los documentos iniciales constituidos por los documentos “Programa, Calendario y Formulas de Consulta”, el “Estudio General de la Demarcación” y el “Proyecto de participación pública”. Los documentos iniciales se sometieron a consulta pública en julio de 2007 por un período de seis meses. Finalizado el período de consulta pública, se recopilaron los resultados (alegaciones, propuestas, sugerencias, etc.) y se incorporaron los cambios en dichos documentos.

En la segunda fase del proceso de planificación, se aprobó el Esquema de Temas Importantes (en adelante ETI), paso previo a la elaboración del Plan Hidrológico de cuenca. Según el artículo 79 del RPH este documento contiene la descripción y valoración de los principales problemas actuales y previsibles de la demarcación relacionados con el agua y las posibles alternativas de actuación, siendo uno de estos objetivos los fenómenos extremos (inundaciones y sequías).

Es por ello, que uno de los 43 temas importantes incluidos en el ETI del primer ciclo, corresponde a “Actuaciones para mitigar el efecto de las avenidas y aumento de la regulación”. En la ficha correspondiente (nº43) se realiza una caracterización del problema dentro del ámbito territorial de la demarcación del Segura, destacando como las zonas con mayor riesgo de inundación las vegas y planicies del río Segura (Vegas Media y Baja) y del río Guadalentín, los núcleos de población atravesados por ramblas, como Cartagena o Puerto Lumbreras, aquellos ubicados aguas abajo de presas, como Santomera o Crevillente, y las ramblas costeras sin infraestructuras de laminación.

En el citado documento se recogen algunos de los últimos episodios de intensos episodios de lluvias torrenciales registrados (conocidos hasta la fecha) como el ocurrido el 28 de septiembre de 2012, en la cuenca vertiente del río Guadalentín que provocaron innumerables daños materiales en los términos de Lorca y Puerto Lumbreras, con pérdida incluso de vidas humanas. En el Pantano de Puentes se

llegó a registrar un caudal de entrada de 2.000 m³/s, aumentando el agua embalsada de 5,1 hm³ a 18 hm³ en apenas unas horas. El río Guadalentín a su paso por la ciudad de Lorca llegó a los 200 m³/s, que es el límite del caudal que puede acoger en este tramo urbano.

En el análisis llevado a cabo se realiza un primer diagnóstico de los principales efectos sobre las masas de agua, evolución y tendencias (el cambio climático puede aumentar la intensidad de la gota fría), así como los principales objetivos, distinguiendo entre los medioambientales (reducir la contaminación por arrastre de tóxicos o contaminantes) y otros objetivos (reducir los daños humanos y materiales).

Dentro de las medidas planteadas para solucionar el problema, se recogen en primer lugar las contempladas en el Plan de Defensa de Avenidas de 1987 (contempladas en el RDL 4/1987, de 13 de noviembre), siendo las siguientes:

1. Mitigación de inundaciones en el río Guadalentín
2. Minoración de los caudales de avenidas en la cuenca del río Mula
3. Defensa de la margen izquierda del río Mundo (Albacete)
4. Mitigación de desbordamiento en la Vegas Media (Murcia) y Baja (Alicante)
5. Defensa de las Vegas de Calasparra y de Valentín
6. Minoración de caudales de avenida en las ramblas del Moro, Judío y Cárcabo
7. Correcciones Hidrológicas en las cuencas receptoras de diferentes zonas

El valor actualizado de las 25 actuaciones y las 6 correcciones hidrológicas para defensa de inundaciones y avenidas en la Cuenca del Segura suponían aproximadamente unos 700 M€ a precios actualizados.

Posteriormente se recogen las medidas que en la fecha de redacción del documento se encontraban en marcha como la actualización de las zonas de riesgo potencial, determinación de puntos especialmente peligrosos y el diseño de un mapa de riesgos potenciales; diseño del Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (en adelante PATRICOVA) y el Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en la Región de Murcia (en adelante INUNMUR); así como las establecidas en el la Directiva 2007/60/CE donde se indican las tres fases de actuación (evaluación preliminar del riesgo potencial significativo, elaboración de mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación y realización de los PGRI).

Finalmente se recogen las posibles medidas a considerar en el futuro plan de cuenca:

Las nuevas medidas de mitigación de los efectos de las avenidas que se consideren necesarias en el marco de la ampliación del Plan de Defensas.
Todas aquellas medidas que nazcan de la implementación de la Directiva 2007/60/CE relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

Estas actuaciones estaban presupuestadas inicialmente en 510 M€ de coste de inversión (se incluían cuatro encauzamientos, dos recrecimientos de presas, trece presas de laminación, un canal aliviadero y la ampliación de la desembocadura de una rambla).

El ETI final, con las modificaciones derivadas del proceso de participación pública y de la reunión del Consejo del Agua de la cuenca del 18 de noviembre de 2010, fue remitido al Consejo del Agua de la Demarcación (en adelante CAD), quien informó favorablemente sobre el mismo el 30 de abril de 2013.



Figura 1. Nuevas infraestructuras laminación avenidas. Fuente: ETI 2009-2015.

La tercera fase del proceso de planificación comprende la elaboración del PHDS. Este documento fue sometido a consulta pública (BOE de 7 de junio de 2013) por un periodo de seis meses. Tras el análisis las aportaciones recibidas, se sometió a la consideración del CAD en su reunión de 19 de diciembre de 2013. Tras su posterior tramitación fue publicado en el BOE de fecha 12 de julio de 2014 (RD 594/2014 de 11 de julio).

El citado documento incluye una recopilación de las actuaciones desarrolladas tanto por el organismo de cuenca como por las comunidades autónomas, en el marco de los PGRI:

- Cartografía del riesgo de inundación. Sistema nacional de Cartografía de Zonas Inundables.
- Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.
- PATRICOVA.
- INUNMUR.
- Plan de Emergencia ante el Riesgo de Inundaciones de Andalucía.
- Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de Castilla-La Mancha (PRICAM).
- Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH).

Adicionalmente, el PHDS 2009/15 recoge en su Programa de Medidas un total de 1.068 medidas con un coste de inversión de 4.819 M€, de las cuales 113 medidas corresponderían a medidas de defensa de avenidas, con una inversión prevista de 606 M€. Estas medidas se dividen en presas de laminación (265 M€), actuaciones lineales en cauces (241 M€) y en un último grupo que abraca actuaciones lineales en cauces, obras de laminación y correcciones hidrológicas forestales (100 M€).

El reparto de estas actuaciones por comunidades autónomas indica que la Región de Murcia abarcaría el 85 % de la inversión (513 M€), Castilla La Mancha el 11 % (68 M€) y la Comunidad Valenciana el 4 % (25 M€).

Finalmente indicar que la programación presupuestaria de estas medidas indicaba que en el horizonte 2009-2011 se preveía una inversión de 7 M€, en el horizonte 2012-2015 de 9 M€, en el horizonte 2016-2021 de 354 M€ y en el horizonte 2022-2027 de 236 M€.

3. CICLO DE PLANIFICACIÓN 2015-2021

De igual modo que sucedió en el primer ciclo de planificación, en la primera fase del proceso de planificación 2015-2021 se aprobaron los documentos iniciales. Estos se sometieron a consulta pública en mayo de 2013 por un período de seis meses. Finalizado el período de consulta pública, se recopilaron los resultados (alegaciones, propuestas, sugerencias, etc.) y se incorporaron los cambios en dichos documentos.

En la segunda fase del proceso de planificación, se aprobó el ETI 2015/21, con las modificaciones derivadas del proceso de participación pública y de la reunión del CAD del 29 de septiembre de 2014.

Dado el escaso periodo de tiempo transcurrido entre la aprobación del ETI 2009/15 y la elaboración del ETI 2015/21 (abril 2013-septiembre 2014), sumado a los problemas presupuestarios del citado intervalo temporal, han impedido el desarrollo y puesta en marcha de muchas de las actuaciones inicialmente previstas. Es por ello, que se mantuvo la misma relación de temas importantes del ciclo anterior, siendo el nº 43 de "Actuaciones para mitigar el efecto de las avenidas y aumento de la regulación".

Las principales novedades en el ETI 2015/21 se centran, en primer lugar, en la evolución y tendencia del problema, en tres periodos:

Evolución histórica hasta el ETI del primer ciclo 2009-2015: El cambio climático puede incrementar la intensidad de los fenómenos de gota fría que son los que generan los episodios de avenidas en el Sureste peninsular.

Situación prevista (Plan 2009-2015): Se recoge un análisis de la riada de San Wenceslao (28/09/2012)
Situación actual y estimada en horizonte 2015: Tras la citada riada, y comprobar el funcionamiento de las infraestructuras existentes, queda de manifiesto la necesidad de ejecutar nuevas infraestructuras.
Otra importante cuestión que se plantea es la publicación conjunta de los PGRI y PHDS, asegurando su tramitación simultánea y la coordinación entre ambos.

En segundo lugar, respecto a las medidas plateadas en el anterior ETI (2009/15), centradas en la construcción de embalses de laminación (204 M€) y actuaciones lineales en cauces (212 M€), se indica que no se había ejecutado ninguna actuación, y se proponen posibles nuevas medidas o redefinición de algunas:

1. Medidas de restauración fluvial y la restauración hidrológico-agroforestal.
2. Medidas de mejora del drenaje de infraestructuras lineales.
3. Medidas adoptadas para el desarrollo o mejora de herramientas para predicción o de ayuda a las decisiones.
4. Medidas de protección civil.
5. Medidas de ordenación territorial y urbanismo.
6. Medidas consideradas para promocionar los seguros frente a inundación.
7. Medidas estructurales planteadas y los estudios coste-beneficio que las justifican.

Finalmente se indican dos alternativas de actuación, por un lado, Alternativa 0 de no actuación, sin aplicación de medidas, y por otro lado la Alternativa 1 de aplicación de las medidas del Plan Hidrológico 2009/15, con una inversión de 416 M€, así como las medidas que se incluyan en el PGRI.

La tercera fase del proceso de planificación comprende la elaboración del PHDS. Este documento fue sometido a consulta pública (Resolución de 30 de diciembre de 2014) por un periodo de seis meses. Tras el análisis las aportaciones recibidas, se sometió a la consideración del CAD en su reunión de 3 de septiembre de 2015. Tras su posterior tramitación fue publicado en el BOE de 19 de enero de 2016 (RD 1/2016 de 8 de enero).

No obstante, como ya ha sido indicado, el PGRI 2010-2015 (primer ciclo) ha sido desarrollado en paralelo y en coordinación con el PHDS 2015/21 (segundo ciclo), compartiendo proceso de evaluación ambiental estratégica. A su vez es importante destacar como las medidas del PGRI se han incluido en el PHDS 2015/21, de forma que todas las medidas contempladas para reducir los efectos de las avenidas se recogen en el citado plan hidrológico.

El PGRI es la herramienta clave de la Directiva europea 2007/60/CE relativa a la "Evaluación y gestión de los riesgos de inundación", que fija para cada Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI en adelante) sus objetivos de gestión del riesgo de inundación, y de acuerdo con cada Administración competente, las actuaciones a realizar. Tras un periodo de consulta pública de 3 meses, el PGRI fue aprobado mediante el RD 18/2016, de 15 de enero (BOE 22 de enero de 2016).

Tal y como se ha indicado, la Directiva 2007/60/CE relativa a la “Evaluación y gestión de los riesgos de inundación”, obliga a los Estados miembros a realizar las siguientes 3 fases:

- Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI en adelante) identificando las ARPSI, tanto de origen fluvial como marino.
- Elaboración de Mapas de Peligrosidad y Riesgo de las ARPSI seleccionadas en la EPRI.
- Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de las ARPSI seleccionadas en la EPRI.

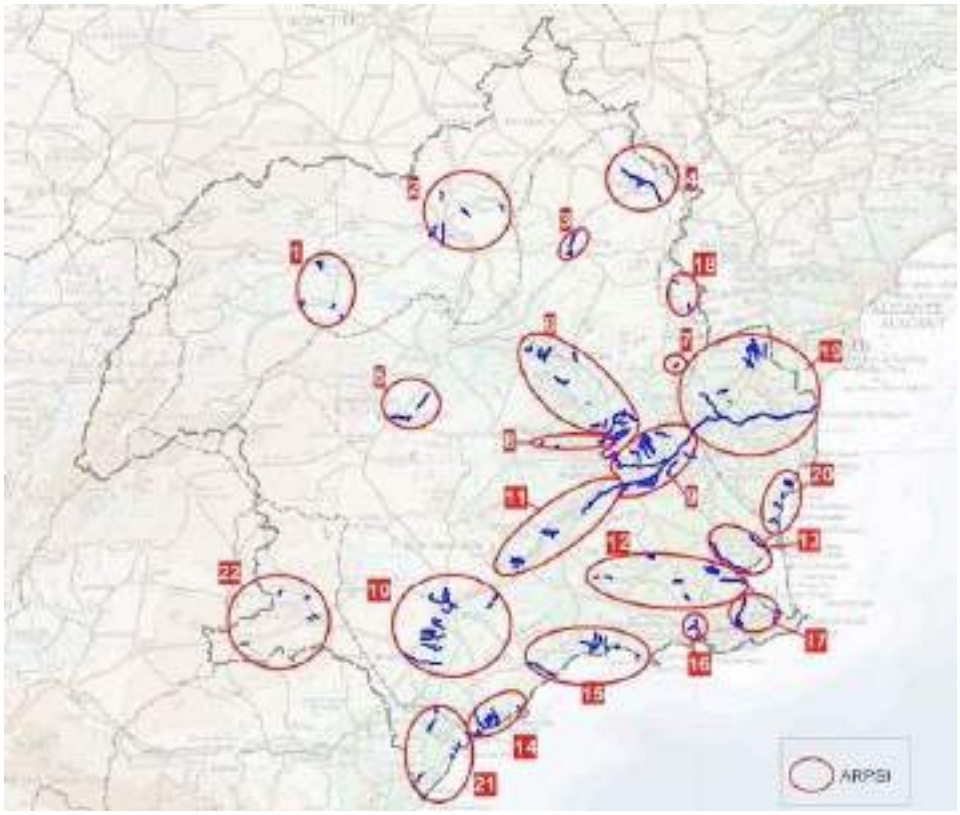


Figura 2. ARPSI de la DHS de origen fluvial. Fuente: PGRI de la DHS.

En la demarcación del Segura se han identificado un total de 35 ARPSI, 22 fluviales y de transición y 13 costeras, con una longitud total de 540,56 km y de 34,49 km, respectivamente, si bien tras la revisión efectuada en la EPRI de las inundaciones de origen marino han resultado finalmente 21 ARPSI costeras con una longitud total de 78,01 km, haciendo un total de 43 ARPSI y 618,57 km.
Para las ARPSI seleccionadas en la fase anterior fue necesario elaborar mapas de peligrosidad y mapas de riesgo de inundación que delimitan las zonas inundables así como los calados del agua, e indicar los daños potenciales que una inundación pueda ocasionar. Todo ello se realizó para los escenarios de probabilidad que establece el RD 903/2010: probabilidad alta, probabilidad media (período de retorno mayor o igual a 100 años) y baja probabilidad o eventos extremos (período de retorno igual a 500 años).

El PGRI tiene como objetivo principal conseguir una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y la sociedad, con el fin de disminuir los riegos y reducir las consecuencias negativas de las inundaciones para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad económica, y las infraestructuras. Para ello, y basándose en la aplicación de programas de medidas coordinados, se pretende obtener un adecuado conocimiento y evaluación de los riesgos asociados a las inundaciones, que minimicen las consecuencias negativas y manteniendo el respeto por el medio ambiente.

En el programa de medidas del PGRI 2010-2015 se recogen un total de 21 medidas (52 medidas específicas) con un presupuesto de 55 M€ (4 medidas de prevención con 29 M€, 8 medidas de protección con 13 M€, 5 medidas de preparación con 13 M€ y 4 medidas de recuperación y revisión). Estas medidas han quedado recogidas también el programa de medidas del PHDS 2015/21, con la diferencia que en el PHDS 2015/21 se recoge como coste final de la medida el evaluado para su ejecución final (incluyendo estudios, redacción del proyecto, expropiaciones y ejecución).

Es necesario indicar que en el Programa de Medidas del PHDS 15/21, además de las medidas directas anteriores para mitigar avenidas, se incluyen medidas que de forma indirecta mejoran la respuesta ante las avenidas, como son las medidas de restauración ambiental, de construcción de humedales artificiales y las medidas contra la erosión.

Por todo ello, el programa de medidas del PHDS 2015/21 recoge un total de 100 medidas frente a inundaciones con 510 M€ de inversión. El reparto de estas actuaciones por comunidades autónomas indica que la Región de Murcia abarcaría el 81 % de la inversión (412 M€), Castilla La Mancha el 16 % (80 M€), Andalucía con el 2 % (11 M€) y la Comunidad Valenciana el 1 % (7 M€).

Finalmente indicar que la programación presupuestaria de estas medidas indicaba que en el horizonte 2015-2021 se preveía una inversión de 110 M€, en el horizonte 2022-2027 de 150 M€ y en el horizonte 2027-2033 de 250 M€.

4. CICLO DE PLANIFICACIÓN 2021-2027

Actualmente nos encontramos en el tercer ciclo de planificación hidrológica 2021-2027, una vez aprobados los documentos iniciales, tras un periodo de consulta pública de 6 meses (tras su publicación 19 de octubre de 2018) y su posterior consolidación.

La siguiente fase del proceso de planificación es el ETI 2021-2027, en consulta pública por un periodo de 6 meses, desde el 24 enero de 2020, y ampliado debido a la crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19, hasta el 30 de octubre de 2020.

El documento del tercer ciclo presenta una agrupación de temas importantes respecto a los dos ciclos

anteriores, pasando de 43 a 16 temas. Esta circunstancia no refleja una solución de los problemas si no una agregación de temáticas lo que permite una mejor concreción en el análisis. El tema correspondiente a inundaciones se sigue manteniendo, pero en este caso como el tema importante nº11 "Gestión del riesgo de inundación".

En este tema se mantiene en esencia lo expuesto en los anteriores ETI, centrando su contenido en el desarrollo de los PGRI y sus actuaciones. Una de ellas contemplaba la "Elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación: leyes de frecuencia de caudales, efecto del cambio climático, modelización de los riesgos de inundación y su evaluación, etc.". Esta medida ha sido desarrollada dentro del marco del Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España" (Plan PIMA Adapta), y ya se han realizado diferentes trabajos, entre los que destaca el documento "Inundaciones y cambio climático. Estudios y experiencias a nivel europeo en el primer ciclo de la Directiva de inundaciones" que incluye una revisión bibliográfica de todos los estudios disponibles a escala global y europea sobre el efecto del cambio climático en las inundaciones.

No obstante, cabe destacar el análisis de alternativas de actuación que se realiza en el ETI, y donde destaca la baja ejecución del programa de medidas del PHDS y PGRI 2015/21. Tal y como se indica en la citada ficha, de las 100 medidas planificadas frente a inundaciones con 510 M€ de inversión, en el año 2018 se habrían ejecutado 35 M€, lo que supone únicamente el 7 % de la inversión total (en el PHDS 2015/21 se contemplaba una inversión para el horizonte 2016-2021 de 110 M€). Es por ello, que el citado tema, las soluciones planteadas marcan como objetivo la ejecución de las 90 medidas pendientes con 475 M€ de inversión.

Finalmente, y de cara a la configuración del futuro Plan Hidrológico, se plantean una serie de actuaciones que coordinen la consecución de los objetivos medioambientales con la gestión del riesgo de inundación:

- Medidas naturales de retención del agua, restauración fluvial y restauración hidrológico-forestal, así como la lucha contra la desertificación.
- Actualización del inventario de las presiones hidromorfológicas y aplicación de los nuevos protocolos de hidromorfología fluvial.
- Recuperación de la red hidrográfica básica y mejora de la continuidad longitudinal y transversal de los cauces.
- Revisar el marco normativo estatal existente.
- Para nuevas obras estructurales (encauzamientos o presas de la laminación), de elevado impacto ambiental y coste económico y social, realizar estudios que aseguren su necesidad y consenso entre los sectores implicados.

5. CONCLUSIONES

A día de hoy, y tal y como ha quedado de manifiesto con las recientes inundaciones ocasionadas por el episodio de DANA del año 2019, el fenómeno de las inundaciones se encuentra lejos de ser superado en los próximos años. Los esfuerzos realizados históricamente en infraestructuras para su contención y para minimizar los efectos que producen, así como en actuaciones no estructurales (menos agresivas con el medioambiente), han quedado recogidas en la planificación nacional y local desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, lo que se ha traducido en avances muy importantes en materia de gestión de este riesgo.

No obstante, el efecto que el cambio climático pueda tener en la frecuencia e intensidad de las inundaciones, hace imprescindible continuar en el avance del conocimiento y en la planificación de

actuaciones que reduzcan sus posibles consecuencias. Prueba de ello es su consideración dentro de algunos de los 17 objetivos de desarrollo sostenible, como por ejemplo "Ciudades y Comunidades Sostenibles" (nº 11) y "Acción por el Clima" (nº13).

En esta línea, desde el Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, se ha lanzado el borrador del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030 (30 de abril de 2020), donde se abordan líneas de actuación para la reducción de los riesgos de inundación: mejora de los sistemas de observación (alertas tempranas), mejora de los PGRI incorporando la variable del cambio climático, integración de los riesgos y la adaptación al cambio climático en la planificación territorial y urbanística, evaluación integrada del riesgo de desastres considerando las proyecciones y escenarios de cambio climático, así como el refuerzo de los sistemas de autoprotección ante desastres climáticos en comunidades de riesgo.

Por lo tanto, ha quedado de manifiesto la importancia en continuar abordando los fenómenos de inundaciones en la planificación, siguiendo una acción coordinada entre las Administraciones Públicas y la sociedad, que reduzcan sus consecuencias negativas. Sin embargo, y tal y como ha sido evaluado en los distintos ciclos de planificación, es necesario un importante esfuerzo inversor para el desarrollo de estas actuaciones, que permita minimizar las consecuencias negativas y mantener el respeto por el medioambiente.

REFERENCIAS

- *CHS (1998). Plan hidrológico de la cuenca del Segura 2015-2021*, aprobado por el Real Decreto 1664/1998 de 24 de julio. Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Segura (OPH de la CHS en adelante). https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/plandecuenca/documentoscompletos/
- UE (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.* Directiva Marco del Agua (DMA). https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524
- Melgarejo Moreno, J. (2001*) Reedición del Proyecto de Obras de Defensa contra las inundaciones en el Valle del Segura, de Ramón García y Luis Gaztelu (1886), 13-34.* Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Medio Ambiente.
- BOE (2003). *Ley de medidas fiscales, administrativas y del orden social que incluye, en su artículo 129, la Modificación del TRLA, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por la que se incorpora al derecho español la Directiva 2000/60/CEE.* https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2003-23936
- CHS (2007). *El Plan de Defensa contra Avenidas de 1987 en la Cuenca del Segura. En: Plan de defensa de avenidas de 1987 frente a avenidas en la cuenca del Segura. XX Aniversario*, 13-35. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Medio Ambiente.
- UE (2007). *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.* https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524
- BOE (2010). *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación* (transposición de la Directiva 2007/60/CE). https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2010-11184
- CHS (2014). *Plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Segura 2009-2015, aprobado por el Real Decreto 594/2014, de 11 de julio*. Documentos Iniciales, Esquema de Temas Importantes y Plan Hidrológico. OPH de la CHS. https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/planificacion/

- CHS (2016). *Plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Segura 2015-2021, aprobado por el Real Decreto 1/2016, de 8 de enero*. Documentos Iniciales, Esquema de Temas Importantes y Plan Hidrológico. OPH de la CHS. https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/planificacion15-21/
- CHS (2020). *Borrador del Esquema provisional de Temas Importantes del tercer ciclo de planificación hidrológica 2021-2027*. OPH de la CHS. https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/planificacion21-27/proceso.html

EL PROBLEMA DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL EN EL NÚCLEO URBANO DE ASPE (ALICANTE)

Esther Sánchez Almodóvar
esther.sanchez@ua.es
https://orcid.org/0000-0003-4201-0779

Javier Martí Talavera
jmt25@alu.ua.es
https://orcid.org/0000-0002-1624-2843

Universidad de Alicante, España

RESUMEN

La escorrentía pluvial se ha convertido en una de las grandes problemáticas del municipio de Aspe. La ocupación de antiguos cauces y la creciente impermeabilización del suelo han contribuido a la generación de torrentes urbanos. Estos se forman con gran rapidez y sin que sea necesaria una gran cantidad de precipitación, tan solo se precisa un episodio puntualmente intenso para provocar problemas de escorrentía, como los ocurridos en los últimos años, lo que pone de manifiesto las insuficientes medidas llevadas a cabo para la mitigación de este problema. A tenor de ello se propone la utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible que permitan, tanto la reducción de la escorrentía urbana, como la utilización de las aguas pluviales para otros usos.

1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades del sureste peninsular presentan, en la actualidad, graves dificultades en cuanto a la gestión de la escorrentía urbana. Un problema histórico que se agrava en los años cincuenta y sesenta de la centuria pasada, cuando las ciudades experimentan un crecimiento económico, que da lugar a la gran expansión de los núcleos urbanos. La continua expansión de los núcleos urbanos ha supuesto una incesante presión sobre los sistemas fluviales naturales, siendo una de las causas que ha propiciado el incremento de los problemas de inundación y anegamiento en las tramas urbanas. Especial importancia presenta este hecho en aquellos ámbitos urbanos que, ubicados en zonas de piedemonte, en la transición entre alineaciones montañosas y llanuras aluviales, han ocasionado, con su expansión, la incorporación de las arterias fluviales al entramado urbano, aumentando la vulnerabilidad de las poblaciones y el riesgo de inundación (Box Amorós & Morales Gil, 1993).

El informe ESPON sobre *Los efectos espaciales y la gestión de los riesgos naturales y tecnológicos en Europa* expone que, las inundaciones se han convertido en un problema cada vez mayor para los entornos edificados, debido a las transformaciones que el ser humano ha efectuado en los cauces de los ríos, en sus áreas propensas a inundaciones y al instalarse en llanuras aluviales. Además, incide sobre las consecuencias que provoca el aumento del sellado del suelo que conduce a un mayor riesgo de inundación, ya que el agua fluye con libertad y no se produce la retención natural del suelo por infiltración (ESPON, 2006, p. 33).

En el marco de las directivas europeas, la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de

actuación en el ámbito de la política de aguas, recoge entre sus objetivos que la protección de las aguas, "contribuya a paliar los efectos de las inundaciones" (Parlamento Europeo. El Consejo de la Unión Europea, 2000, p. 5). Para ello se desarrolló, de forma específica, la Directiva 2007/60/CEE del Parlamento europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, en la que de manera expresa se indica que:

> *Las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse. No obstante, algunas actividades humanas (como el incremento de los asentamientos humanos y los bienes económicos en las llanuras aluviales y la reducción de la capacidad natural de retención de las aguas por el suelo) y el cambio climático están contribuyendo a aumentar las probabilidades de que ocurran, así como su impacto negativo* (Parlamento Europeo. El Consejo de la Unión Europea, 2007, p. 27).

Dicha directiva se traspuso al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación (España. Ministerio de la Presidencia, 2010). El problema de la gestión de la escorrentía recobra mayor interés si cabe ante el contexto actual de cambio climático, en el que el efecto del calentamiento global incide de manera directa en el aumento de los extremos atmosféricos de forma que, estudios recientes, indican que las precipitaciones, poseen mayor torrencialidad y elevada intensidad horaria (IPCC, 2014; Olcina Cantos & Vera-Rebollo, 2016). Este cambio de modalidad de la precipitación es el que ocasiona los anegamientos de los medios urbanos y colapsa las redes de saneamiento y de evacuación de pluviales (Olcina Cantos et al., 2018).

Según la Plataforma de intercambio y consulta de información sobre adaptación al cambio climático en España (*Plataforma Nacional de Adaptación al Cambio Climático*, n.d.), para el municipio de Aspe y con el escenario previsto para la RCP4.5, las temperaturas máximas y mínimas subirían según la media de los modelos, en el entorno de los 0.5ºC. En cuanto a la precipitación se proyecta un aumento de los valores medios de 0.7 mm/día y un aumento de 3.86 mm/día de la precipitación máxima diaria.

La *Estrategia de Adaptación al Cambio Climático* aprobada en 2013 por la Unión Europea, contribuye a aumentar la resiliencia del territorio europeo mediante la aplicación de ocho actuaciones en todas las escalas territoriales (Comisión Europea, 2013). La Estrategia, apoya la iniciativa del *Pacto de Alcaldes por el Clima y la Energía,* iniciado en 2008, para la adaptación de las ciudades. A escala nacional, la Federación Española de Municipios y Provincias y la Red de Ciudades Españolas por el Clima, han elaborado un documento informativo titulado *Vulnerabilidad al cambio climático a escala local* (2010) y una *Guía para el desarrollo de normativa local en lucha contra el cambio climático* (2012), con el objetivo de que las administraciones locales redacten sus ordenanzas en materia de adaptación al cambio climático (citado en Olcina Cantos et al., 2018, p. 12).

Es en la década de los noventa, cuando comienzan a promoverse las actuaciones sostenibles en el medio que deben cumplir con los principios de sostenibilidad marcados en la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro en 1992. En esta década surge, ante la problemática de la escasez de recursos hídricos, un nuevo enfoque de pensamiento, de la mano de la Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA), que centró su interés en las fuentes de recursos no convencionales, como la depuración, desalación y aprovechamiento de pluviales (Rico Amorós et al., 2016). La regulación de dichos aprovechamientos vino marcada por la Directiva Europea 91/271, de 21 de mayo, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, en la que se indica que "[…] en la práctica no es posible construir los sistemas colectores y las instalaciones de tratamiento de manera que se puedan someter a tratamiento la totalidad de las aguas residuales en circunstancias tales como lluvias torrenciales […]" (Consejo Europeo, 1991, p. 46).

Ante los principios marcados por las directivas europeas y el marco normativo nacional en materia de calidad ambiental y drenaje urbano previsto en el Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas (España. Ministerio de Agricultura, 2012) y el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, el Reglamento de la Planificación Hidrológica y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales (España. Ministerio de Agricultura y Pesca, 2016), es de vital importancia establecer un nuevo horizonte en la gestión de las escorrentías en medios urbanos que permita cumplir el *Objetivo 6 Agua Limpia y Saneamiento* enmarcado en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas. Asamblea General, 2015), lo cual pone de relevancia la implementación de medidas más sostenibles, lideradas por los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

1.1. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo, el núcleo urbano de Aspe, se localiza en el sureste de la Península Ibérica, en la provincia de Alicante, concretamente en la comarca del Medio Vinalopó. Su particularidad geográfica más destacable es su emplazamiento. El núcleo urbano de Aspe se asienta sobre un glacis con una ligera pendiente (± del 8 %) en el piedemonte de la sierra Cantal de Eraes, en la transición de la citada sierra y la llanura aluvial del río Tarafa. Hay que destacar esta característica geográfica, es muy relevante para el análisis que se propone, puesto que determinará el comportamiento de la escorrentía en el entramado urbano. La posición geográfica de este núcleo y el crecimiento urbano experimentado desde la década de los años cincuenta y sesenta, determina los problemas de anegamiento que se producen en el callejero debido al incremento de la superficie urbana impermeable que genera mayores volúmenes de escorrentía. A ello hay que añadir, asimismo, la existencia de una red de saneamiento que, aunque renovada en algunos tramos, continúa siendo insuficiente.

1.2. Justificación y objetivos

En el ámbito de los riesgos naturales, en concreto las inundaciones, siempre ha predominado el estudio de la afección de la escorrentía a nivel de cuenca fluvial o de desbordamiento de cauces fluviales. Este trabajo centra su interés en analizar los efectos que un episodio de lluvia torrencial puede ocasionar en un medio urbano. Un espacio antropizado, que ha experimentado una profunda transformación en cuanto a usos del suelo y que, en la actualidad, se encuentra totalmente sellado, incrementando el riesgo de inundación y la vulnerabilidad de dicha población. Este análisis toma relevancia ante el actual contexto de cambio climático en el que nos encontramos. Según los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014), el continuo incremento del calentamiento global provocado en gran medida por la actividad humana y el aumento de los gases de efecto invernadero, es una causa clara de los efectos del cambio climático. Consecuencia directa de este hecho es el desarrollo de un mayor número de fenómenos extremos atmosféricos. En cuanto a las precipitaciones, es evidente el cambio en la modalidad de las lluvias, que se traduce en "[…] el aumento de la frecuencia, intensidad o cantidad de precipitaciones intensas […]" (IPCC, 2018, p. 7).

La expansión de la superficie urbana, los cambios de usos del suelo, la desorganización de los sistemas hidrológicos naturales con la incorporación de arterias fluviales al entramado urbano y la consiguiente impermeabilización, son la causa de los problemas de escorrentía urbana actuales. A ello unido la problemática estructural existente que plantea la red de colectores que, aunque renovados algunos de ellos, en ocasiones, su capacidad es insuficiente. Los efectos derivados del crecimiento urbanístico y la afección, cada vez mayor, del cambio climático en áreas urbanas, ocasiona un gran impacto en el drenaje de las aguas pluviales, provocando la insuficiencia de la red de saneamiento para drenar grandes volúmenes de escorrentía urbana (Jato-Espino et al., 2018).

El objetivo principal de este trabajo es identificar las zonas problemáticas del núcleo urbano atendiendo a los efectos que los episodios de lluvias de los últimos años han provocado en el área urbana. Partiendo del objetivo principal, se pretende establecer propuestas de mejora para la mitigación de la problemática, así como identificar acciones ejecutadas en el medio que, más que suponer un beneficio, agravan la problemática de la gestión de la escorrentía superficial en el callejero.

2. METODOLOGÍA

La metodología para el análisis de las zonas conflictivas del área urbana se centra en: (1) caracterizar el reto de la gestión del agua de lluvia tanto a nivel cuantitativo como cualitativo, atendiendo al área urbana permeable e impermeable y la identificación de las últimas acciones de impermeabilización; (2) el impacto de lluvias torrenciales en la red de saneamiento, analizada de forma general por Sánchez Almodóvar (2018), en la estación depuradora de aguas residuales y en los ecosistemas acuáticos receptores; (3) descripción de la pluviometría local y análisis de los episodios que han generado mayores niveles de escorrentía urbana en los últimos cuatro años; (4) identificación de los sectores más conflictivos del área urbana en los episodios de precipitación con alta intensidad horaria mediante imágenes de los últimos episodios más intensos; (5) propuestas de drenaje sostenible para la reducción de la escorrentía en los puntos conflictivos.

3. RESULTADOS

La gestión de la inundación en los medios urbanos se ha caracterizado por la implementación de medidas estructurales duras y de gran envergadura, como pueden ser la desviación de cauces fluviales, su canalización y artificialización, además de la continua renovación de las redes de saneamiento para el control de las aguas residuales y la captación de la escorrentía producida por las aguas de tormenta (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2009). Con el objetivo de gestionar la escorrentía en los medios urbanos, la medida por excelencia más implementada ha sido el continuo dimensionamiento de los sistemas convencionales de saneamiento y drenaje, en los cuales no se ha tenido en cuenta la torrencialidad de la precipitación y la gran carga contaminante de estas aguas. Esta escorrentía no puede considerarse aguas “blancas” libre de contaminación, puesto que la contaminación atmosférica, el lavado de la superficie urbana contaminada por las actividades humanas y la mezcla de la escorrentía pluvial con aguas residuales en los sistemas unitarios (Soriano Martínez, 2015, p. 13), determinan el incremento de la carga contaminante existente desde el momento de la precipitación.

Para el caso del municipio aspense, es en la década de los noventa cuando se acomete la construcción de un canal de avenamiento al pie de la sierra Cantal de Eraes (1991-1992), para reducir el nivel de escorrentía avenado al núcleo urbano. Dicha medida no fue suficiente para mitigar el problema y en el año 1998 se redacta el Plan Director de Saneamiento que contempla la renovación de diversos colectores, proyecta nuevos colectores en las zonas más problemáticas y la construcción de nueve aliviaderos que conforman los puntos de descarga de la red al cauce del río Tarafa, en momentos de sobrecarga de la misma (Sánchez Almodóvar, 2018). A pesar de las medidas implementadas, los anegamientos en el interior del núcleo urbano continúan produciéndose con episodios de lluvias de fuerte intensidad horaria como los que se comentan a continuación.

A partir de la información pluviométrica obtenida de Weather Underground se ha podido conocer la intensidad horaria de distintos episodios que han afectado al núcleo urbano y término municipal de Aspe en los últimos años. Algunos de ellos, como el acontecido los días 8 y 9 de junio de 2020, derivan de situaciones atmosféricas cuyo origen es totalmente convectivo, tratándose de episodios muy cortos y localizados, de ahí esas diferencias entre los distintos observatorios, pero con una fuerte intensidad horaria. En otros casos, como el episodio asociado a la Depresión Aislada en Niveles Altos

(DANA) de septiembre de 2019 se trataría de una situación mixta, donde las precipitaciones se deben a un componente orográfico y convectivo, y por tanto son episodios que pueden durar varias horas, con una intensidad horaria, por lo general, más baja, pero con un mayor acumulado.

Como se aprecia en la Tabla 1, el episodio que tuvo una mayor intensidad horaria en los observatorios meteorológicos utilizados fue el del 8 de junio, en el que se registró un pico de 180,6 mm/hora y una acumulación de más de 40 l/m^2. El episodio de precipitaciones asociado a la gota fría de septiembre de 2019 también registraría, intensidades por encima de los 100 mm/hora, llegando a acumular 132,8 l/m^2 el día 12. Sin embargo, el episodio provocado por la borrasca Gloria, entre el 19 y 21 de enero de 2020, estuvo caracterizado por intensidades mucho más débiles, ya que se trató, fundamentalmente, de chubascos orográficos. Otros episodios con intensidades horarias importantes serían el del 16 de agosto de 2018, con una cifra de 132,6 mm/hora, y el 9 de junio, con un valor de 128,3 mm/hora. No obstante, cabe destacar la tormenta producida el 15 de septiembre de 2017, donde la escasez de registros impide conocer las dimensiones de este episodio, que según la prensa local dejó un pico de precipitación de 280 mm/hora (‘Aspe: Las lluvias alcanzaron una intensidad de 280 litros por hora en Aspe’, 2017). A partir de la selección de episodios de lluvia que han registrado las estaciones próximas al núcleo urbano de Aspe, se han seleccionado aquellos que presentan una mayor intensidad horaria. Se observa, que las tormentas de mayor intensidad han sido las que han originado mayor problemática en cuanto a la escorrentía urbana.

	IAASPE2	IASPE10	IASPE11	IASPE15	IASPE13	Media
15/09/2017	-	32,5	-	-	-	32,5
18/10/2017	-	39,6	-	-	-	39,6
16/08/2018	132,6	7,11	-	-	4,1	47,9
08/09/2018	29,5	3,6	33,3	-	4,1	17,6
11/09/2019	29,5	8,9	41,4	53,3	11,4	28,9
12/09/2019	105,7	45	166,4	-	43,7	90,2
13/09/2019	70,1	30,5	65,3	65,3	14,5	49,1
14/09/2019	74,9	73,9	155,7	89,9	0	78,9
20/01/2020	18	8,9	54,4	10,8	11,4	20,7
21/01/2020	21,1	36,1	38,9	-	11,4	26,9
27/04/2020	62,3	52,3	75,7	88,1	-	69,6
08/06/2020	163,3	7,1	180,6	77,5	-	107,1
09/06/2020	112,8	0	128,3	112,8	-	88,5

Tabla 1: Intensidades de precipitación horaria (mm/hora) registradas en el término municipal de Aspe. Fuente: Weather Underground.

3.1. Episodio 15 de septiembre de 2017

La única información que ofrece Weather Underground sobre este episodio es de una finca agrícola ubicada en la partida rural de Alcaná (IASPE10), donde se recogieron aproximadamente 12 l/m^2, en cuatro tandas de precipitación, siendo la más importante la primera de ellas, en la que en apenas 10 minutos se recogerían 5,3 l/m^2, con un pico de intensidad horaria de 32.5 mm/hora. Sin embargo, esta estación se encuentra a 6 km en línea recta del casco urbano y no refleja el grado de severidad de este episodio en el interior del mismo. Para ello es necesario recurrir a la información aparecida en la prensa, en la que se indica que se recogieron 40 l/m^2 en 30 minutos, con un pico de intensidad de 280 mm/hora, ya mencionado anteriormente, que causó problemas en diversos puntos del entramado urbano (Figura 1).



Figura 1. A. Alcantarilla rebosando agua en la intersección de la Avda. Juan Carlos I y calle Cuevas Pasos. B. Escorrentía urbana y arrastre del mobiliario de las terrazas en la calle Dr. Fleming. C. Escorrentía urbana y arrastre del mobiliario de las terrazas en la calle Sagunto. D. Escorrentía urbana en la intersección de la calle Nueve de Octubre y Bailén. E. Escorrentía urbana en la calle Badajoz hacia la calle Cádiz. Fuente: 'Aspe: las lluvias alcanzaron una intensidad de 280 litros por hora en Aspe' (2017) y vía Facebook Antonio Puerto, A (https://bit.ly/386V6dj), D (https://bit.ly/2BQAhqf), E (https://bit.ly/38csqiX).

3.2. Episodio 27 de abril de 2020

No obstante, no es necesario una intensidad horaria de la precipitación muy fuerte o un gran acumulado para que se generen problemas de escorrentía en el núcleo urbano. En este episodio la intensidad horaria media de todas las estaciones utilizadas fue de unos 70 mm/hora y los acumulados apenas sobrepasaron los 10 l/m^2. La estación que mayores cifras registró fue la ubicada en las cercanías del polideportivo de Aspe (IASPE15), donde se acumularon 16 l/m^2 en 20 minutos. Una cifra muy similar a la recogida en la ciudad donde se llegó a los 15 l/m^2. Cabe destacar durante este episodio la presencia de granizo menudo en algunos puntos del término municipal (Figura 2).



Figura 2. A. Escorrentía urbana en la calle Vicente Cervera. B. Escorrentía en la intersección de la calle Vicente Cervera y Avda. Gran Capitán (foto de Alexandra Pérez Roca). C. Escorrentía urbana en la intersección de la calle Santa Faz e intersección con la calle Cádiz (foto de Carla Navarro Peñalver). D. Escorrentía urbana en la calle Sol (foto de David Martínez Amorrich). E. Escorrentía urbana en la calle Barranco (foto de Antonio Rodenas Sánchez.).

3.3. Episodio 8 de junio de 2020

Este episodio es el que posee una mayor intensidad horaria media de toda la muestra, con 107,1 mm/hora, y con dos observatorios con un pico de precipitación superior a los 150 mm/hora, ambos situados en la Urbanización Santa Elena (IAASPE2 y IASPE11), al suroeste del núcleo urbano. Esta tormenta dejó de forma puntual acumulados superiores a los 40 l/m^2 en 40 minutos y provocó numerosos problemas en el callejero (Figura 3).



Figura 3. A. Escorrentía urbana en la calle Santa Faz (foto de Abel Magdaleno Almodóvar). B. Escorrentía en la intersección de la calle Santa Faz y Cádiz (foto de Carla Navarro Peñalver). C. Escorrentía urbana en la calle Sol (foto de David Martínez Amorrich). D. Escorrentía urbana en la calle Barranco (foto de Antonio Rodenas Sánchez).

3.4. Episodio 9 de junio de 2020

Este episodio guarda cierta relación con el anterior, ya que se produjo con unas condiciones atmosféricas muy similares; sin embargo, este episodio fue más localizado y no tan intenso, puesto que se sobrepasaron levemente los 100 mm/hora. Prácticamente se inició a la misma hora que el anterior y los mayores acumulados se volvieron a registrar en la Urbanización Santa Elena, donde se recogieron 23 l/m^2, en media hora. Dentro de la ciudad, los acumulados fueron menores, apenas se registraron unos 10 l/m^2, pero nuevamente hubo problemas con la escorrentía (Figura 4).



Figura 4. A. Escorrentía urbana en la intersección de la calle Santa Faz y Cádiz. B. Escorrentía urbana en la calle Barranco (foto de German Pomares). C. Escorrentía urbana en la calle Barranco (foto de German Pomares). D. Aliviadero al río Tarafa en la Avda. Constitución y calle San Pascual.

3.5. Análisis de resultados

Las consecuencias de estos episodios son fruto de la transformación territorial, el crecimiento urbano y la falta de planificación que, unido a los efectos del cambio climático, con aumento de la recurrencia

de gotas frías (Muñoz et al., 2020) y un incremento de la intensidad horaria de estos episodios (Olcina & Biener, 2019), generan efectos más negativos en el entorno urbano. Ante esta problemática, una de las soluciones que más interés está despertando es la implementación de SUDS, como alternativa al drenaje convencional, que permite gestionar de forma más sostenible la escorrentía urbana. La esencia de estos sistemas se basa en reproducir el ciclo hidrológico natural existente antes del proceso urbanizador, siendo su función la de reducir el impacto del crecimiento urbano en cuanto a cantidad y calidad de la escorrentía (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2008; Woods-Ballard et al., 2007). A la problemática presentada en este medio urbano cuando acontecen lluvias torrenciales, se une una gestión del territorio insuficiente, ya que durante el mes de mayo se acometió el hormigonado de las medianeras y rotondas de varios viales que constituían pequeñas zonas verdes (Figura 5). Estas pequeñas superficies, son zonas potenciales para la implementación de SUDS, puesto que es el incremento de la superficie impermeable la que agrava el problema de la escorrentía urbana.



Figura 5. Hormigonado y césped artificial en las jardineras de medianeras y rotondas en la Avada. Gran Capitán (Aspe), incremento de la superficie impermeable. Fuente: Esther Sánchez y Javier Martí (30 mayo y 30 de junio de 2020).

Algunas de las propuestas que se pueden contemplar y estudiar de forma más pormenorizada (Figura 6) con los estudios hidrológicos e hidráulicos previos pertinentes, podrían ser la instalación de pozos de infiltración rellenos de material filtrante (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2008, p. 98) en rotondas, en especial en las que se ubican en la parte sur del núcleo y que conforman las zonas con mayor altitud, para, de esta forma, permitir la captación de la escorrentía generada por la tormenta. En las medianeras de las grandes avenidas se podrías implantar drenes filtrantes o franceses (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2008, p. 98), que permiten que las zonas con materiales filtrantes capten y filtren la escorrentía superficial de las superficies próximas para transportarlas, por un conducto subterráneo, aguas abajo y disminuir el volumen de escorrentía. En parques y jardines o solares sin urbanizar inmediatos a zonas problemáticas se podría analizar la posibilidad de instalar depósitos de detención en superficie o subterráneos (Perales Momparler & Andrés-Doménech, 2008, p. 99), estudiando previamente la potencialidad y capacidad que ofrece el terreno. De esta forma se almacenarían los volúmenes de escorrentía que se generan aguas arriba, se laminaría el caudal de crecida y, posteriormente, se bombearía el caudal a la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).

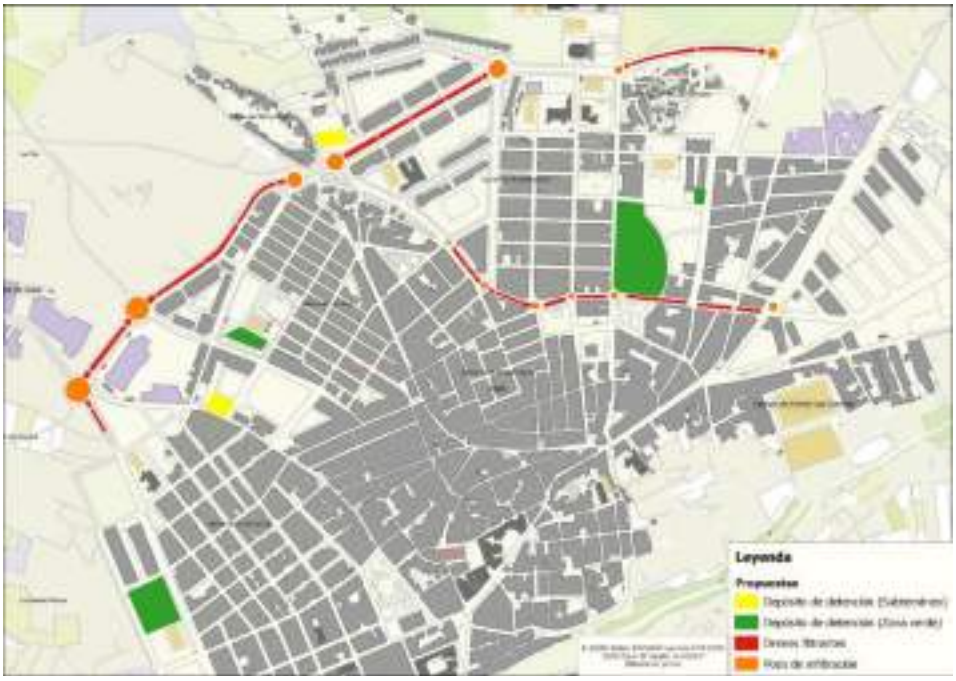


Figura 6. Propuesta de SUDS para el núcleo urbano de Aspe. Elaboración propia.

En los puntos más problemáticos se debe contemplar la opción de ampliar los imbornales urbanos con el objetivo de que el volumen de captación de la escorrentía superficial sea mayor (Figura 7). Esta medida podría contribuir a mitigar la acumulación de agua de escorrentía que se produce en distintos puntos del callejero, como por ejemplo en la calle Santa Faz, donde el imbornal de pequeñas dimensiones no es suficiente para avenar el caudal procedente de aguas arriba. Además, hay que tener en cuenta que en muchas ocasiones los elementos urbanos, como son los badenes, pueden suponer un obstáculo en la circulación de la escorrentía, como sucede en este punto (Figura 7. Foto A).



Figura 7. Imbornal calle Santa Faz y badén que dificulta la circulación de la escorrentía (A). Imbornal de la Avda. Alcalde Ramón Berenguer (B), prototipo de imbornal utilizado en el segundo Plan de Obras de Inversión entre 2015-2016 para la renovación de colectores (Sánchez Almodóvar, 2018, pp. 65–66). Fuente: Esther Sánchez y Javier Martí (30 de junio 2020).

Para evitar efectos perjudiciales en el proceso de depuración del agua residual en la EDAR cuando se producen precipitaciones importantes, debido a que se supera la capacidad de tratamiento de la planta (Sánchez Almodóvar, 2019), se podría estudiar la construcción de un depósito anti-DSU a la entrada de la EDAR, que permitiera almacenar el volumen de aguas correspondiente al pico de caudal

de la tormenta, de forma que el proceso de depuración no se vea perjudicado. En caso de que el volumen recibido en el depósito sea superior a la capacidad de este, entonces, se produciría la derivación al río teniendo en cuenta el porcentaje de disolución con el que se realiza el vertido directo al río.

4. CONCLUSIONES

La continua expansión del núcleo urbano aspense, el cambio en los usos del suelo, el asfaltado de los viales y su consiguiente impermeabilización, así como la incorporación al entramado urbano de barrancos y ramblas, produjeron la desorganización de todo el sistema hidrológico natural, y obligaron a la adopción de una serie de medidas para minimizar, en la medida de lo posible, la afección de las escorrentías procedentes de la ladera norte de la sierra Cantal de Eraes.

Las actuaciones realizadas contribuyeron a la reducción de la problemática en el interior del núcleo urbano, pero no la erradicaron. A ello hay que añadir que el crecimiento urbano se realizó con una escasa planificación en cuanto a la gestión de la escorrentía se refiere, y a la existencia de una red de saneamiento insuficiente y deteriorada, que ha ocasionado múltiples problemas en el casco urbano aspense.

A pesar de las remodelaciones del sistema de saneamiento ejecutadas desde los comienzos del siglo XXI, aún quedan muchas zonas conflictivas donde estas infraestructuras son deficitarias. Probada la insuficiencia de la red de alcantarillado para el correcto avenamiento de las aguas cuando se producen episodios de lluvias copiosas e intensas, resulta necesario abordar esta cuestión desde una óptica diferente que la del simple dimensionamiento de los colectores.

En efecto, deberían contemplarse opciones que permitieran una gestión de la escorrentía urbana más sostenible y eficiente, como puede ser el aumento de zonas verdes que incremente el porcentaje de infiltración de la escorrentía superficial. La existencia de una red de alcantarillado separativa permitiría la recogida de las aguas de arroyada separadamente de las residuales urbanas, pero la envergadura de esta infraestructura y su presupuesto complican su ejecución. La existencia de una red unitaria imposibilita la gestión adecuada de la escorrentía urbana cuando se producen precipitaciones abundantes, puesto que la red no es capaz de avenar el volumen de agua circulante, entrando en carga los aliviaderos al río que, a pesar de haber sido proyectados para que el agua vertida al cauce tenga un alto grado de disolución y poca carga contaminante, lo cierto es que muchos residuos sólidos llegan al cauce. Por otro lado, la existencia de un colector general que transporta de forma conjunta aguas residuales y pluviales a la EDAR repercute negativamente en el proceso de depuración, ya que se necesita un periodo de tiempo suficiente para alcanzar el funcionamiento previo al episodio torrencial. Sin olvidar que, cuando el caudal de entrada a la EDAR es superior al que esta puede soportar, se activa un aliviadero que avena el agua sin depurar directamente al río.

El interés por la gestión de las aguas pluviales ha aumentado en las últimas décadas al ser consideradas como un recurso importante dentro del ciclo hidrológico urbano. A tenor de ello, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (SUDS), son una herramienta para afrontar la gestión de las aguas pluviales, actuando, principalmente, en la reducción de la escorrentía circulante y en la mejora de la calidad de las aguas. Estas actuaciones deben ser consideradas, principalmente, en la zona sur del núcleo urbano por ser la de mayor cota altimétrica y potencialmente generadora de la escorrentía.

REFERENCIAS

- Aspe: Las lluvias alcanzaron una intensidad de 280 litros por hora en Aspe. (2017, September

18). *Valle de Las Uvas Aspe Noticias*. https://valledelasuvas.es/2017/09/18/aspe-las-lluvias-alcanzaron-una-intensidad-280-litros-hora-aspe/

- Box Amorós, M. & Morales Gil, A. (1993). Barrancos y ramblas: su incorporación al entramado urbano en el sureste peninsular. *Investigaciones Geográficas*, *11*, 153–169. https://doi.org/10.14198/INGEO1993.11.03
- Comisión Europea. (2013). *Estrategia de adaptación al cambio climático de la UE*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0216
- Consejo Europeo. (1991). Directiva 91/271/CEE del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Diario Oficial de La Unión Europea Nº L*, *135*, *21 de mayo*, 40–52. http://data.europa.eu/eli/dir/1991/271/oj
- España. Ministerio de Agricultura, A. y M. A. (2012). Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995. *Boletín Oficial Del Estado*, *227*, *20 de septiembre*, 66167–66194. https://doi.org/BOE-A-2012-11779
- España. Ministerio de Agricultura y Pesca, A. y M. A. (2016). Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007. *Boletín Oficial Del Estado*, *314*, *29 de diciembre*, 91133–91175.
- España. Ministerio de la Presidencia. (2010). Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. *Boletín Oficial Del Estado*, *171*, *15 de julio*, 61954–61967. https://www.boe.es/eli/es/rd/2010/07/09/903
- ESPON. (2006). *The Spatial Effects and Management of Natural and Technological Hazards in Europe* (P. Schmidt-Thomé (Ed.)). https://doi.org/10.1016/S0264-410X(12)01439-9
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (E. principal de Redacción, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer (Eds.)).
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change* (T. W. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor (Ed.)).
- Jato-Espino, D., Sillanpää, N., Andrés-Doménech, I. & Rodriguez-Hernandez, J. (2018). Flood risk assessment in urban catchments using multiple regression analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *144*(2). https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000874
- Muñoz, C., Schultz, D. & Vaughan, G. (2020). A midlatitude climatology and interannual variability of 200- And 500-hPa cut-off lows. *Journal of Climate*, *33*(6), 2201–2222. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0497.1
- Naciones Unidas. Asamblea General. (2015). *Resolución A/RES/70/1 Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. 25 de septiembre de 2015*, 40. https://undocs.org/es/A/RES/70/1
- Olcina Cantos, J., Campos Rosique, A., Casals del Busto, I., Ayanz López-Cuervo, J., Rodríguez Mateos, M. & Martínez Puentes, M. (2018). Resiliencia en el ciclo urbano del agua. Extremos pluviométricos y adaptación al cambio climático en el ámbito mediterráneo. *Universidad de Alicante*, *8*. http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/76370
- Olcina Cantos, J. & Vera-Rebollo, J. F. (2016). Adaptación del sector turístico al cambio climático en España. La importancia de las acciones a escala local y en empresas turísticas. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, *36*(2), 321–352.

https://doi.org/10.5209/AGUC.53588
- Olcina, J. & Biener, S. (2019). ¿Está cambiando el clima valenciano? Realidades e incertidumbres. En: J. Olcina & E. Moltó (Eds.), *Climas y tiempos del País Valenciano*, 162–170. Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Parlamento Europeo. El Consejo de la Unión Europea. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de La Unión Europea. Serie L*, *43*(327, 23 de octubre), 72. http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
- Parlamento Europeo. El Consejo de la Unión Europea. (2007). Directiva 2007/60/CE del Parlamente Europeo y el Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. *Diario Oficial de La Unión Europea. Serie L*, *20*(288, 6 de noviembre), 27–34. http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj
- Perales Momparler, S. & Andrés-Doménech, I. (2008). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *Retema: Revista Técnica de Medio Ambiente*, *21*(124), 92–104.
- Perales Momparler, S. & Andrés-Doménech, I. (2009). *Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del aguas de lluvia*. *3*(3), 1–8.
- *Plataforma Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. (n.d.). Retrieved 26 June 2020, from https://www.adaptecca.es/
- Rico Amorós, A. M., Arahuetes Hidalgo, A. & Morote Seguido, Á. F. (2016). Depuración y reutilización de aguas residuales en las regiones de Murcia y Valencia. En: J. F. Vera Rebollo, J. Olcina Cantos & M. Hernández Hernández (Eds.), *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la Geografía. Libro Homenaje al Profesor Alfredo Morales Gil*, 1169–1202. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. https://doi.org/10.14198 / LibroHomenajeAlfredoMorales2016-52
- Sánchez Almodóvar, E. (2018). *Recursos hídricos no convencionales en Aspe: un modelo local de gestión integrada del riesgo de inundación y del aprovechamiento conjunto de aguas residuales y de la escorrentía urbana* [Trabajo Fin de Máster]. http://hdl.handle.net/10045/76907
- Sánchez Almodóvar, E. (2019). Valoración, regeneración y uso de recursos hídricos no convencionales en el municipio de Aspe: un modelo local de gestión integrada de los riesgos de inundación y sequía. En: M. C. Adrián Rodríguez, M. Á. Álvarez-Váquez & E. De Uña-Álvarez (Eds.), *Persectivas del agua: investigación, gestión y valores del agua en el mundo actual*, 117–131. Dykinson.
- Soriano Martínez, L. (2015). *Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: aplicación a la ciudad de Zaragoza* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. http://oa.upm.es/38474/
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual (C697)*. CIRIA. https://www.ciria.org//Memberships/The_SUDS_Manual_C753_Chapters.aspx

AS OBRAS DE PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES NO MARCO DA ECONOMIA CIRCULAR

Felipe da Silva Claudino
Universidade do Vale do Itajaí, UNIVALI, Brasil
felipesclaudino@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-3545-2798

RESUMO

As mudanças climáticas, o crescimento populacional, a expansão da ocupação do solo e a vulnerabilidade das populações diante de inundações, resulta na necessidade de construção de obras de infraestrutura para controle do nível das águas e gestão do seu uso. Para atender a estas demandas, há necessidade de construção de obras de infraestrutura, estas quais alteram de maneira significativa o ambiente em que estão ocorrendo estes impactos antes, durante e depois da obra concluída. O presente trabalho busca apresentar os tipos de impactos provocados decorrente destas obras. Por ambiente é explorado as dimensões naturais, econômica, social e paisagística, e subliminarmente a questão cultural, inserida na questão social e paisagística. Em um segundo momento é apresentado as formulações criadas para quantificar os impactos causados para uma melhor comparação. E, por fim, é exposta a economia circular como uma saída para uma economia atual.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, o crescimento populacional, a expansão da ocupação do solo e a vulnerabilidade das populações diante de inundações, põe em risco direitos fundamentais, como por exemplo, a vida, a propriedade, dentre outros. E para atender a estas demandas há necessidade de construção de obras de infraestrutura, estas quais alteram de maneira significativa o ambiente em que estão ocorrendo estes impactos antes, durante e depois da obra concluída.

O presente trabalho busca apresentar os tipos de impactos provocados decorrente das obras de infraestrutura para produzir uma melhor qualidade de vida. Por ambiente é explorado as dimensões naturais, econômica, social e paisagística, e subliminarmente a questão cultural, inserida na questão social e paisagística. Em um segundo momento é apresentado as formulações criadas para quantificar os impactos causados para uma melhor comparação, podendo ser estudados antes, durante e depois das ações antrópicas para apurar quais foram os impactos ou danos causados ao meio. Depois é exposta a economia circular como uma saída para uma economia suicida atual, ou seja, a linear, que não contempla o aproveitamento dos recursos utilizados na natureza. E por último é apresentado uma alternativa de uso múltiplo das obras de infraestrutura para controle de inundações com o objetivo de mitigar os efeitos gerados por elas, gerando assim, o menor impacto possível ao meio ambiente destas obras.

2. IMPACTOS DAS OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Ao realizar obras de infraestrutura o ser humano muda e altera o meio que vive, quer seja, estrada, pontes, viadutos, barragem, hidrelétrica, transposição de fluxos de águas, e muitas outras, há impactos de grande medida no ambiente. Neste trabalho, o ambiente será abordado em quatro aspectos, o ambiental (meio natural), paisagístico (cultural), econômico e social.

Há necessidade de ser realizada uma distinta diferenciação entre impacto e dano. O impacto é a alteração da das propriedades de uma determinada coisa, ou seja, uma ação antrópica vem a alterar as condições atuais de um recurso natural, a paisagem de algum lugar, a economia de um local e a qualidade de vida, apesar de ser uma constatação objetiva, seus resultados são subjetivos, pois são qualitativos, subdividindo-se em positivos (benéficos) ou negativos (adversos). O dano está vinculado aos conceitos de prejuízo, e prejuízo é um desequilíbrio da "balança" da justiça.

Portanto, impacto não é dano, mas se a soma dos impactos for negativa, irá causar um prejuízo, logo causou dano e o contrário também é válido, pois se a soma dos impactos for positiva, irá causar lucro e então gerou vantagem. Há ainda a possibilidade de impacto neutro, ou seja, o resultado da apuração dos impactos não foi positivo, nem negativo. Neste sentido, Eloy Fenker (2011) afirma que impacto é tudo, e poderá ter o sentido positivo, neutro ou negativo, já o dano só poderá ter sentido negativo.

Considerando uma visão sistêmica ou holística, não se pode atestar que as obras para propiciar o desenvolvimento são danosas, há de ser considerado todos os aspectos quanto possíveis para se chegar à conclusão se esta obra venha a ser positiva ou negativa.

2.1. Impactos Ambientais

O homem, como ator integrante do meio ambiente, altera a realidade do meio, impactando e alterando o ecossistema. A "questão ambiental" adquiriu relevância a partir dos anos 1960 atribuindo uma dimensão social e política a área ambiental, tendo como marco para o movimento ambiental moderno a obra Primavera Silenciosa de Rachel Carson (1969). Barbieri (2003) relata que as preocupações ambientais, em um primeiro momento, se mostraram como problemas locais; depois, em um segundo momento, a perturbação ambiental é vista como algo generalizado, mas limitado aos territórios nacionais; e, em um terceiro momento, é constatado que a questão ambiental é um problema planetário.

A degradação ambiental levou o ser humano a reconhecer que ecossistema é essencial para o desenvolvimento econômico e tecnológico. Também, não há como melhorar a qualidade de vida sem uma melhora da qualidade ambiental (Ely, 1998).

Para Valéria Sucena Hammes (2012), os impactos ambientais são efeitos da diversidade e da complexidade de uso e ocupação do espaço geográfico; está relacionado com as necessidades de existência do ser humano e as atividades desempenhadas por eles que alteram o ambiente natural. Maria Célia Nunes Coelho (2001) conceitua impacto ambiental como um processo de mudanças sociais e ecológicas causadas por perturbações ambientais, considerando essas como uma nova ocupação, construção de um novo objeto.
Contata-se que o impacto ambiental tem diferentes óticas, caracterizados por terem aspectos multidisciplinares, e a avaliação deve ser conjunta, analisada de maneira coletiva para tomada de ações solidárias.

Peter Wathern (2013) conceituou impacto ambiental como mudança do parâmetro ambiental em determinado período e em uma determinada área, resultante de uma atividade. Não deve se resumir a modificações nas estruturas naturais tangíveis, mas devem ser consideradas as relações que existentes no ecossistema e que conferem sua funcionalidade. Esta definição é baseada na dimensão dinâmica dos processos proposto por Munn com fundamento de que as alterações ambientais são denominadas impactos.

Apesar de haver inúmeras conceituações de impacto ambiental, a legislação não deixou de tratar deste este tema. A primeira nação a abordar a temática de impacto ambiental foram os Estados Unidos da América através da National Environmental Policy of Act (Política Ambiental Nacional) de 1969. No

México a Ley General Del Equilibrio Ecológico Y La Protección Al Ambiente definiu impacto ambiental como a "modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza". Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 152-B/2017 definiu como o "conjunto das alterações favoráveis e desfavoráveis produzidas no ambiente, sobre determinados fatores, num determinado período de tempo e numa determinada área, resultantes da realização de um projeto, comparadas com a situação que ocorreria, nesse período de tempo e nessa área, se esse projeto não viesse a ter lugar". Na Finlândia, o Ympäristönsuojelulaki (Ato de Proteção Ambiental, 527/2014) definiu como os efeitos diretos e indiretos dentro e fora do território finlandês de um projeto ou operações. Na Espanha, a Ley 21/2013 definiu como "alteración de carácter permanente o de larga duración de uno o varios factores", que são, "la población, la salud humana, la flora, la fauna, la biodiversidad, la geodiversidad, la tierra, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, el clima, el cambio climático, el paisaje, los bienes materiales, incluido el patrimonio cultural, y la interacción entre todos los factores mencionados". No Brasil, segundo o Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) que editou a Resolução nº 001/1986, definiu como "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante da atividade humana".

Os vários conceitos apresentados, ponderam apenas os aspectos negativos, salvo a definição portuguesa, que estabelece que poderão ser favoráveis ou desfavoráveis, dessa forma, os impactos poderão ter conotação positiva também.

Portanto, pode-se consolidar o conceito de impacto ambiental como alteração da qualidade natural através do cambio de processos naturais de ações antrópicas, podendo ser benéfica ou maléfica, tangível ou intangível, comparado a situação anterior as ações desempenhadas.

2.2. Impactos paisagísticos

O ser humano na condição de animal cultural interage com o meio ambiente de diversas maneiras, inclusive com a paisagem. Como um conjunto de recursos naturais ou artificiais formadores de um plano perceptível, a paisagem é fonte de inspiração artistas e projetistas dos tempos mais antigos, servindo como meio de manifestações de emoções e sentimentos. A paisagem está relacionada com a percepção do exterior. Ela é a maneira de como o homem vê o seu entorno, uma visão estética e a formação de um povo passa pela identificação e formação de sua paisagem.

Os recursos paisagísticos poderão ser obras da natureza ou provenientes de ações antrópicas e, desde que consolidada, integra valores históricos, artísticos, científicos, etnológicos ou antropológicos. A paisagem é um "producto del tiempo, revela lo que somos, nuestro propio sentido, por lo que constituye un legado cultural, un patrimonio vivo y frágil, un testigo delicado envuelto en el trasiego del territorio" (Sabalza Hernáez, 2003, p. 23).

O conceito de cultura é apresentado por Antonio Carlos Brasil Pinto (2003) como a soma dos conhecimentos adquiridos sem herança genética, passados através das gerações, mediante socialização. A partir da paisagem natural muitas culturas foram formadas gerando outras paisagens criadas pelos seres humanos, a artificial. "Esa posibilidad de lectura muestra, además, la calidad de la relación del hombre y el medio natural reflejada en el paisaje" (Checa-Artasu, 2018, p.7). A intervenção do homem na natureza faz com que ela se transforme, e essa alteração envolve uma mudança cultural.

A Convenção Europeia de Paisagem de 2000 reconheceu o valor da paisagem como expressão da diversidade do patrimônio comum, natural e cultural, da humanidade e fundamento de sua identidade, e de relevância para políticas públicas para planejamento, organização e gestão dos espaços públicos. O reconhecimento patrimonial da paisagem a insere na classificação de bem. Bens são valores

atribuídos a alguma coisa, poderá ser material ou imaterial, e objeto de relação jurídica. Bens jurídicos são todos aqueles que poderão ser tutelados.

Os bens paisagísticos, poderão ser assim classificados pela sua singularidade, suas qualidades únicas, que poderá decorrer daquilo que se vê, ou até mesmo, da história única do lugar, portanto este valor poderá ser visual ou histórico. Com isso, é atribuída a este bem características de bem comum. Esta prerrogativa é caracterizada por não haver possibilidade de apropriação, este tipo de bens estão situados em uma terceira posição em relação a titularidade dos bens, não podem ser classificados como bens públicos, nem como bens privados, são bens de interesse social. Constituem um patrimônio comum de toda coletividade que extrapola o exercício da titularidade de uma pessoa, seja essa pessoa física ou jurídica, sendo caracterizado como um bem transindividual.

Uma legislação avançada sobre esta matéria está na Europa, através da Convenção Europeia de Paisagem realizada em Florência no ano de 2000. A Itália incorporou esta normativa através do Decreto Legislativo 42 de 22 de janeiro de 2004 (Codice dei beni culturali e del paesaggio). Nesta norma italiana, a paisagem é reconhecida como um valor prioritário e deve prevalecer sobre os interesses territoriais, urbanos ou setoriais. Poderia ser considerado como bem cultural ambiental. Este reconhecimento estabelece limitações e restrições às propriedades. O planejamento da paisagem parte do reconhecimento dos elementos morfológicos do território e propõe a conservação de suas características, e é, o elemento central do sistema de proteção e melhoria da paisagem. Todo este reconhecimento, este sistema de tutela, visa buscar a valorização do território.

A Constituição Espanhola não contemplou o valor da paisagem em seu corpo normativo, nem há uma legislação nacional sobre este tema, apesar de haver ratificado a Convenção Europeia em 2007. No Brasil, os aspectos paisagísticos são reconhecidos como patrimônio cultural pela Constituição Brasileira e contemplado pela legislação ordinária, havendo inúmeros institutos para proteção da paisagem. Assim como na Espanha, no Brasil os aspectos paisagísticos estão inseridos nos instrumentos de avaliação de impacto ambiental e, mais recentemente no Brasil, na avaliação de impacto de vizinhança.

As obras de infraestrutura alteram de maneira substancial o espaço geográfico, total ou parcialmente, fazendo com que o local se transforme de maneira a cercear o uso, não apenas a diminuir a qualidade de aproveitamento do bem comum, mas limitar fisicamente o seu acesso, ou até mesmo extinguir completamente o bem paisagístico. Portanto, por impacto paisagístico tem como a alteração dos aspectos perceptíveis daquilo que se contempla, ou seja, há uma alteração visual de um bem de maneira a torná-lo irreconhecível, ou mesmo, possibilitando a capacidade de contemplação somente de maneira parcial.

2.3. Impactos econômicos

Dentro os impactos causados em decorrência da ação antrópicas ao meio ambiente, em sentido lato, os econômicos são os mais facilmente mensurados. Através de coleta de dados, são analisados, mensurados e comparados no decorrer do tempo, podendo ser realizado um exame minucioso do antes e depois. Esta modalidade de impacto está ligada à ideia de Produto Interno Bruto (PIB).

A teoria do valor criado apresenta um conceito moderno de valor. Para Michael E. Porter (1989), o conceito de valor está vinculado ao que os compradores estão dispostos a pagar. De maneira não divergente, Coimbatore K. Prahalad e Venkat Ramaswamy (2004, p.169) complementam este conceito de valor ao afirmar que o “valor está associado às experiências; os produtos e serviços facilitam experiências individuais e experiências medidas pela comunidade”.

PIB é o somatório de todos os bens e serviços produzidos em uma economia em determinado período, é uma métrica de produção e que, dentre outras funções, mede a atividade econômica. Há de se destacar que ele não mede a acumulação da riqueza, somente sua produção durante determinado lapso temporal. Ele é um indicador de fluxo de novos bens e serviços finais. Portanto, percebe-se a importância do conceito de valor para determinação de um impacto econômico.

Nesse sentido, o impacto econômico consiste na diferença da produção econômica ocorrida em determinado local em comparação de momentos distintos. O PIB, como métrica, realiza uma apuração de valores em dois períodos diferentes efetuando o levantamento da produção de uma determinada região, com isso é possível uma análise e avaliação das consequências geradas com determinada ação, atividade etc. e quantificar seu impacto.

Pode-se recorrer às Ciências Contábeis para apuração do impacto econômico, que poderá ser positivo ou negativo, em razão disto, será tratado sobre Resultado ou Rédito Contábil. Resultado é gênero e suas espécies são lucro e prejuízo. Logo, as ações que impactam de maneira positiva geram lucro, já as que impactam de maneira negativa causam prejuízo.

Nas considerações de Antônio Lopes de Sá (2012), sobre a gestão da resultabilidade ou da capacidade de lucrar ou, ainda, na possibilidade de gerar riqueza, assevera que a análise das correlações das funções dos diversos sistemas de funções patrimoniais com o sistema específico da produção do rédito que se deve colher os subsídios básicos para a construção dos modelos que servirão de suporte à gestão da capacidade lucrativa, considerando ainda, as relações ambientais da riqueza.

Apesar da riqueza ser medida de maneira econômica, nas palavras do referido autor, deve-se levar em conta os aspectos qualitativos. Não poderá ser considerada apenas as expressões monetárias. E vai além ao afirmar que se restringir a uma contabilidade de custos para a formação de preço ou valor, é ficar enclausurado em apenas um aspecto de uma questão complexa (Lopes de Sá, 2012). Pela Teoria das Funções Sistemáticas e suas dimensões, mesmo apresentando um critério objetivo para apuração do PIB, a atribuição do valor final engloba uma complexidade de dimensões com a possibilidade de absorver os passivos decorrente do desenvolvimento econômico.

Com isso, para efetuar a apuração se uma obra de infraestrutura impactou de maneira benéfica ou prejudicial, basta uma comparação lógica. Se um PIB anterior for maior que outro posterior, gerou prejuízo, e, portanto, o impacto ocorrido foi negativo, e, se ocorrer o contrário, então gerou lucro, portanto o impacto ocorrido foi positivo.

Dessa forma, para uma análise comparativa mais ampla, a complexidade passa pela formação do valor e não pela soma em si. Todas essas dimensões devem ser consideradas para apurar o valor de determinada mercadoria para, então, poder constatar as diferenças perceptíveis entre os dois pontos da comparação do impacto econômico ocasionado.

2.4. Impactos sociais

As grandes obras de engenharia, ou de infraestrutura, são importantes vetores para o desenvolvimento econômico e mudanças sociais, pois geram impactos, podendo ser diretos e indiretos. Foi nos anos 1970 quando foi utilizado o termo “avaliação de impacto social” pela primeira vez para se referir as mudanças que sofreriam uma tribo indígena para que passasse por suas terras um oleoduto. Estas obras de engenharia eram consideradas como marca de progresso, uma manifestação do domínio da natureza, até começar a ser percebido os efeitos negativos destas intervenções do meio ambiente, e passou-se a questionar estes custos. Estes custos poderão ser traduzidos como impactos.

Segundo a doutrina de Frank Vanclay (2002, p.191), "impacto social refere-se aos impactos realmente experimentados pelos seres humanos (nos níveis de agregação individual e superior) no sentido corporativo (físico) ou cognitivo (perceptivo)". Então, impacto social é a percepção sentido pelos indivíduos das mudanças sociais ocorridas no seu entorno, ou meio ambiente social, podendo ser física ou psíquica.

A gama de impactos elencados que constituirão as variáveis poderão ter significados distintos para cada indivíduo e comunidade, podendo, ainda, cada grupo de uma mesma comunidade apresentar avaliação divergente, e, ainda, poderá mudar ao longo do tempo dentro de um mesmo grupo, comunidade ou para um indivíduo.

Há necessidade de se realizar uma importante distinção entre impacto e mudanças. As mudanças são alterações dos processos sociais e poderão ser definidas de maneira objetiva e independente umas das outras. Já os impactos são expressões ou interpretações que são dadas a cada processo de mudança, de acordo com o contexto em que se encontra e da maneira que a população afetada o valoriza. Os impactos sociais dependem da percepção que os sujeitos experimentam os efeitos das mudanças. (Aledo & Aznar, 2018).

Em relação aos efeitos, eles são um estágio prévio ao impacto, ou seja, estão intimamente ligadas as primeiras alterações do processo de mudança. Os efeitos são as condições determinantes que irão alterar o ambiente e o resultado desta alteração são os impactos. Um impacto decorre de uma mudança, mas nem toda mudança leva a um impacto social. Estes impactos são constituídos por processos dinâmicos e complexos. Os efeitos interveem de forma interdependente, uns com os outros, alterando as condições antes estabelecidos, os processos de mudanças atuam de forma intermediária, entre as alterações e os impactos, sendo esses as percepções experimentadas pelas comunidades, grupos e, até mesmo, indivíduos (Aledo & Aznar, 2018).

Os impactos sociais ainda poderão ser diretos, que são aqueles decorrentes de processos de mudança social planejada, ou indiretos, os oriundos de alterações biofísicas. Portanto, os projetos que em princípio visam uma mudança ambiental, em um segundo momento acabam gerando mudanças sociais para as populações do entorno do projeto que são afetadas. Quando se trata de grandes obras de engenharia, as transformações sociais ocorrem antes, durante e depois da construção. Em grande parte dos projetos, a incerteza e o medo sentidos durante o planejamento ou quando ocorre em fase de discussão do projeto pode ser, por muitas vezes maior que os impactos decorrente do projeto (Burdge & Vanclay, 1996).

Portanto, os impactos sociais sofridos por obras de infraestrutura não são estáticos, mas dinâmicos, eles se alteram com o decorrer do tempo durante todo o projeto, desde o planejamento até a conclusão da execução. Com isso, é necessário um acompanhamento completo para apurar e tentar mitigar estes impactos de maneira mais eficaz possível, para se evitar um dano.

3. APURAÇÃO DOS IMPACTOS

Com a intenção de estudar os variados impactos da atividade humana sobre o ambiente, existem fórmulas criadas para quantificar o impacto causado pelas ações humanas e facilitar a comparação entre as causas de impacto e conseguir observar suas consequências.

Os vetores destas mudanças poderão ser observados a partir do aspecto econômico do desenvolvimento, principalmente na relação entre crescimento econômico e meio ambiente. As obras de infraestrutura ou de engenharia, como marcos do desenvolvimento transparecem as necessidades das comunidades e a valoração que é dada a estes efeitos é observado através da Curva Ambiental de

Kuznets (CAK). A CAK consiste em um U invertido que apresenta três fases: a primeira, uma fase de crescimento econômico, a sociedade não tem condições de preservar o meio ambiente; a segunda, é a chamada turning point, onde a linha ascendente alcança seu pico, então passa a ceder espaço, iniciando a curva descendente; a terceira ocorre quando alcançado algum patamar de desenvolvimento econômico, gera um acréscimo no nível de educação, e, em decorrência disto, passa a se ter um maior nível de preservação do meio ambiente. Constatado por Grossman e Kueger (1995) e Shafik e Bandyopadhyay (1992), nos trabalhos apresentados no World Development Report de 1992 de, tendo como conclusão de que a renda tem papel fundamental na determinação da qualidade ambiental.

Diante da análise dos impactos apresentados anteriormente, conclui-se que estão todos interligados, e o desenvolvimento de um depende da capacidade de resiliência do outro. Portanto, o turning point ou o ponto máximo da curva deve estar abaixo deste limite resiliente, ou seja, tem de ser sustentável.

Para tanto, para se mensurar a possibilidade de realização de uma grande obra de engenharia, deverá ser considerado inúmeros fatores e variáveis. E para isso, nesta situação, serão considerados as fórmulas IPAT e STIRPAT.

O IPAT é um modelo clássico de análise de impacto ambiental desenvolvido por Paul Ehrlich e John Holdren em 1971. Ela tem como elemento central a população e consiste em que impacto ambiental (I) é igual ao produto da população (P), da afluência (A) e da tecnologia (T). Portanto, poderia ser formulado como: $I = P \times A \times T$ (Chertow, 2000).

Barry Commoner apurou um modelo de equação que poderia englobar mais detalhes. Partiu do pressuposto que impacto é apurado pela quantidade de poluente lançado no meio ambiente por ano. Então, para representar a afluência, ela seria o quociente entre a produção e/ou consumo de bens pela população; e a tecnologia seria representada pela capacidade de eficiência do processo produtivo em relação a emissão de poluentes, portanto, seria o quociente entre a poluição por unidades produzidas e/ou consumidas. Este conceito pode ser representado pela seguinte equação (Chertow, 2000):

$$Impacto = população \times \frac{produção/consumo}{população} \times \frac{poluição}{produção/consumo}$$

Críticos ao IPAT afirmam que o modelo é útil para apurações contábeis e econômicas, pois geram medidas de eficiência e de impacto ambiental de maneira linear, mas não são capazes de verificar os aspectos subjetivos dos indutores humanos no impacto ambiental.

Diante destas críticas, Dietz e Rosa (1998) apresentaram a principal evolução ao IPAT, o modelo chamado STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology). Este modelo foi utilizado para analisar as forças motrizes dos impactos ambientais com sucesso. O STIRPAT é um modelo estocástico que poderá ser utilizado como teste de modo empírico, existindo assim um campo maior para a realização de pesquisas quantitativas (York, Rosa, & Dietz, 2003). O modelo foi formulado assim:

$$I_i = a\, P_i^b\, A_i^c\, T_i^d\, e_i$$

Observando a equação, deve-se primeiro perceber que ‘a’ é a escala do modelo, os termos ‘b’, ‘c’ e ‘d’ são os expoentes para população (P), afluência (A) e tecnologia (T), ao termo ‘e’ recebe a atribuição de erro, ou seja, recebe aqueles índices não apurados nos outros termos da equação, e o índice ‘i’ representa variações das quantidades observadas.

Outra forma de apurar os impactos causados é através da Avaliação de Impacto Social (AIS). Ela se

caracteriza por ser um processo de gestão dos aspectos sociais decorrente de ações planejadas. Seu objetivo não é somente mensurar de maneira quantitativa o impacto gerado na comunidade da intervenção gerada, mas também gerir os riscos. A equação é apresentada da seguinte maneira (Aledo & Aznar, 2018):

$$Risco = \frac{Ameaça\ x\ Vulnerabilidade\ x\ Exposição}{Capacidade\ de\ adapção}$$

Por ameaça, entende-se que as obras de intervenção ao meio ambiente são vetores das mudanças sociais, iniciando com o projeto, estas obras abrem espaço para conflitos entre grupos para ver quem irá decidir todo o processo, e com isso obter as maiores vantagens, é uma ameaça pois os grupos mais vulneráveis são os que ficarão mais sujeitos aos efeitos negativos. A vulnerabilidade está relacionada com a comunidade, seria a capacidade de resistir ou se recuperar das ameaças provocadas por estas obras que alteram o meio ambiente. E a exposição está vinculara ao território afetado, e seria a localização e a proximidade de um risco, podendo ser este risco físico ou social (Aledo & Aznar, 2018).

Esta formulação visa superar a tradicional separação entre natureza e sociedade, elas são dependentes uma da outra e onde se produz impactos socioambientais. Não há como separar os impactos decorrentes das ações antrópicas, estão todos interligadas pelos efeitos gerados sentidos pelos indivíduos. Natureza, economia, paisagem, cultura estão todos intimamente ligados pelo aspecto social que é o real objetivo de toda intervenção.

4. ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular, como método de recuperação dos recursos naturais, deve prever em suas formulações as compensações dos impactos das obras de engenharia. Ela está relacionada com a duração dos produtos, com o tempo que eles permanecem em uso. Está interrelacionada com o crescimento inteligente, integrador e sustentável.

O objetivo desta economia é fazer com que os valores destes produtos, materiais, recursos e serviços se mantenha o maior tempo possível no mercado, tornando-os os mais eficientes possíveis. Os resíduos de um, deverão ser recursos para os outros. Os produtos deverão ser projetados com a ideia em mente de ser "desconstruído", e estes resíduos serem base para outros produtos. É um sistema de projeção futura, mesmo sem poder se fazer previsão das inovações tecnológicas. Uma porta aberta para a eterna otimização dos processos. Este modelo de economia tem o foco de maximizar o uso dos recursos naturais. Ela se apresenta como um compromisso com as futuras gerações de manter o meio ambiente ecologicamente equilibrado.

A economia circular não se limita a certa categoria de bens, ou um setor do mercado, ela engloba a totalidade da economia, inclui todos os produtos e serviços (Melgarejo Moreno, 2019). Por se tratar de todos os bens produzidos, a economia circular deve englobar as obras de infraestrutura. Pois para o desenvolvimento destas obras há uma necessidade de transformação do meio ambiental, social, econômico e paisagístico, há uma remodelação do ambiente. Conforme relatório da Comissão Europeia, "las infraestructuras, los modelos de negocio y la tecnología actuales, junto con los comportamientos, mantienen a la economía 'bloqueada' en el modelo lineal" (Comisión Europea, 2014).

O desenvolvimento da economia circular visa diminuir a utilização dos recursos naturais, a produção de resíduos e limitar o conjunto de energia. Esta forma de economia deverá reorientar a produção dos países, pois, além dos claros benefícios ambientais, ainda proporciona um novo setor econômico a

ser explorado, criando riqueza e emprego (Melgarejo Moreno, 2019). Este modelo econômico pode ser iniciado através da formulação de políticas públicas e implementados por instrumentos regulatórios da produção e consumo. Na Europa se deu através da aprovação de legislação comunitária, estabelecendo metas, passando-se a implementação nos Estados-membros através da internalização da norma regional e efetivação das metas.

Em 2014 a Comissão Europeia emitiu comunicado ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comitê Econômico e Social Europeu e ao Comitê das Regiões informando o programa de zero resíduos para a Europa chamado Rumo à uma Economia Circular. Neste documento, é afirmado que "avanzar hacia modelos económicos más circulares promete a la economía europea un futuro mucho más brillante" (Comisión Europea, 2014). Seria um renascimento da indústria, uma indústria sustentável. Com isso, contém no comunicado metas para se estabelecer políticas incentivadoras, através de design e inovação, de desobstruções de investimentos em soluções, educação e acompanhamento das ações das empresas e cidadãos, modernização da política de gestão dos resíduos, e estabelecimento de objetivos de eficiência e uso dos recursos.

O Plano de Ação para a Economia Circular da Comissão Europeia de março de 2020 determina restrições a produtos destinados a uma única utilização, ou seja, descartáveis. Intitulado "Mudando a forma como produzimos e consumimos", é um dos principais blocos do Acordo Verde Europeu que tem um objetivo ambicioso, dissociar o crescimento econômico do uso de recursos. Uma economia circular reduz a pressão sobre recursos naturais e é condição para se alcançar a neutralidade climática até 2050. Ainda, entre as medidas anunciadas, pretende-se combater à obsolescência programada e a proibição da destruição de bens não vendidos. Nas palavras do vice-presidente executivo do Acordo Verde Europeu, Frans Timmermans (2020), "preservar nosso ambiente natural e fortalecer nossa competitividade econômica, requer uma economia totalmente circular. Hoje, nossa economia ainda é quase totalmente linear, com apenas 12% dos materiais e recursos secundários sendo trazidos de volta à economia".

Apesar da implementação das diretrizes sobre economia circular depender da incorporação dos países membros da UE, já há um marco estabelecido guiando nas nações da comunidade para chegar a esse objetivo. Esta normativa torna-se um norteador das políticas nacionais de desenvolvimento, um verdadeiro desenvolvimento sustentável.

O conceito de economia circular torna os processos produtivos mais eficientes. Hoje há uma percepção que ninguém está isolado, todos fazemos parte de um todo, de um ciclo, assim como o ciclo da água, a água dos mares e oceanos se evaporam, formam-se as nuvens, os ventos as carregam e espalham, a água cai em forma de chuva e volta a integrar o sistema hídrico, de maneira igual todos estão integrados e sofrem as consequências da exploração e degradação dos recursos naturais.

5. OBRAS DE GESTÃO DE INUNDAÇÃO

As alterações climáticas são fatos que vem ocorrendo nos últimos anos com cada vez mais intensidade. O aumento dos dias de estiagem e de chuva são um exemplo, ou seja, ocorre que se passam muitos dias sem chuva e quando chove é de maneira torrencial, ultrapassam os limites de absorção da água gerando inundações, pois o solo, cada vez mais impermeável e o sistema fluvial de esgotamento não conseguem escoar a água de maneira a evitar estas cheias.

Desta necessidade, as obras de infraestrutura visam atender a demandas da sociedade para proporcionar uma melhor qualidade de vida, isto é, segurança de o patrimônio dos habitantes não será perdido com estas enchentes. Uma das obras mais usuais para prevenir cheias é a construção de barragens em pontos estratégicos com o objetivo de gerir o nível dos rios, reversando água quando

ocorre as cheias e escoando em períodos de seca. Ocorre que estas obras alteram o meio ambiente natural de maneira a estocar grande quantidade de água em local que o ecossistema não estava preparado para isso, e, portanto, a partir desta obra, irá ocasionar uma alteração na fauna e flora, sem contar com as alterações nos fluxos de evaporação da água em decorrência de grande acumulo de água em um grande local e, com isso, podendo cambiar novamente o fluxo de chuvas e o nível dos rios, assim sendo, percebe-se que é um ciclo vicioso.

Não menos importante, ocorre uma alteração na paisagem do local, alterando a cultura e, por consequência, a vida das pessoas que vivem aos arredores desta obra, ainda, há uma alteração nos meios de produção local, gerando mudanças sociais de grande relevância, influenciando uma área muito maior do que a obra em si, pois, em decorrência dela, poderá ocorrer mudanças dos habitantes locais para outras localidades gerando impactos em vários locais diferentes. Mas como já visto, estas obras, dentro de uma análise prévia do projeto, durante o andamento da obra e mesmo após sua conclusão deverão mensurar se irão gerar vantagem ou desvantagem com sua conclusão de seu andamento, através de formulações técnicas multidisciplinares. É uma questão de gestão de todo o desenvolvimento. Diante disso, entendendo as consequências dos impactos gerados em decorrência destas obras, que se iniciam quando há a especulação de um futuro projeto, alterando de muitas maneiras diferentes o meio.

Em uma economia circular tem que se ter em mente, já no desenvolvimento do produto, a maneira de construção e desconstrução da coisa, ou seja, no caso da construção de barragens, deve ser desenvolvido o projeto para que, no caso de não haver mais necessidade, pois isso é uma possibilidade em decorrência das mudanças climáticas, uma maneira de se desfazer a obra e um aproveitamento de sua estrutura para outra necessidade, reconstituindo o ambiente natural anterior.

Outra forma de se mitigar os impactos gerados com a obra é a utilização múltipla da obra, fazendo com que não seja necessário construir outras infraestrutura para atender estas necessidades, por exemplo, ao realizar uma construção de barragem para evitar cheias, utilizando para controle do nível do rio, poderia ser utilizada, de igual forma, para geração de energia elétrica, através de hidrelétrica, ainda, armazenamento para tratamento de água para consumo, e outras finalidades que o conhecimento e a criatividade humana poderão aplicar.

Portanto, uma grande obra de engenharia irá impactar de maneira substancial o meio ambiente e os impactos destas construções, que são evidente, poderiam ser amenizados com o seu uso de maneiras diversas, pois, com isso, não necessitaria o desenvolvimento de outros projetos, e faria com que isso resguardasse o meio ambiente de maneira sustentável.

6. CONCLUSÃO

Toda a atividade gera impacto, e ele pode ser positivo ou negativo. No caso de consolidação desse impacto ambiental negativo tem-se o dano ambiental, que difere de impacto, pois este se apresenta como alteração do meio, não sendo necessariamente um cambio negativo.

Atualmente, a forma de produção é fundada no modelo linear e ele se apresenta como um suicídio, pois não é pensada sistematicamente. Para se tornar sustentável, deve-se utilizar um modelo de aproveitamento dos recursos, gerando uma economia de matéria-prima, energia, resíduos, dentre outros recursos. O modelo que mais se adequa a este objetivo de conservação seria o de economia circular.

As obras de infraestrutura geram impactos dos mais variados pois são grandes obras, requerem grandes investimentos e geram inúmeras consequências, antes, durante e depois da sua conclusão.

Com isso, ao utilizar o uso múltiplo destas obras faria com que os impactos gerados por elas sejam absorvidos pelas suas finalidades, tornando-os mais amenos.

Apesar destas obras de infraestrutura modificarem o ambiente, alterarem a estrutura social local, há necessidade também de conservá-las, pois fazem parte de um patrimônio histórico e cultural. Elas se consolidam com o meio e passam a fazer parte da paisagem local, cabendo uma tutela jurídica não somente dela, mas de todo o seu entorno.

No Brasil, o Decreto 9.763 de 2019 reconhece que obras arquitetônicas, grupos de construções isoladas ou não, obras de construções pelo homem ou integradas pela natureza compõe o patrimônio histórico e cultural. Na Espanha, pela Lei 16/1985, que trata do Patrimônio Histórico Espanhol, é reconhecido que bens imóveis que constituem realizações arquitetônicas e de engenharia se constituem como monumentos e, por tanto, fazem parte do patrimônio histórico e cultural.

Diante disso, se propõe que para alcançar os objetivos propostos pela Agenda 2030, e uma sociedade sustentável, há uma necessidade de um desenvolvimento a longo prazo de políticas de desenvolvimento integradas que abordem a incorporação dos serviços com a produção fazendo com que ao desenvolver uma região, seja pensada de maneira eficiente a construção de infraestruturas que cause o menor impacto possível com a obtenção da maior vantagem disponível.

Para isso, é necessário um planejamento da ocupação do solo e a utilização dos recursos naturais, um plano de urbanização, uma política ambiental abrangendo inúmeras dimensões, de gestão de resíduos, e de produção. Mas eles deverão ser integrados, pois de maneira isolada não se tornam eficazes.

REFERÊNCIAS

- Aledo, A. & Aznar, P. (2018). Conceptualización de La EIS e definiciones clave. Em: J. Domínguez-Gómez & A. Aledo, *Evaluacion de Impacto Social*, 43-53. Publicacions Institucionals de la Universitat d'Alacant, San Vicent del Raspeig.
- Antrop, M. (2000). Geography and landscape science. *Belgeo*, 9-35.
- Barbieri, J. (2003). *Desenvolvimento e Meio Ambiente: As Estratégias de Mudanças da Agenda 21* (6 ed. ed.). Vozes, Petrópolis, RJ.
- Burdge, R., & Vanclay, F. (1996). Social impact assessment: a contribution to the state of the art series. *Impact Assessment*, p. 59-86. https://doi.org/10.1080/07349165.1996.9725886
- Carson, R. (1969). *Primavera Silenciosa.* Portico, São Paulo.
- Checa-Artasu, M. (2018). El paisaje como bien común y como un derecho. Algunas reflexiones. *Biblio 3w: revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*. Acesso em 02 de Maio de 2020, https://www.raco.cat/index.php/Biblio3w/article/view/343353
- Chertow, M. (2000). The IPAT equation and its variants. *Journal of industrial ecology, 4*(4), 13-29. https://doi.org/10.1162/10881980052541927
- Coelho, M. (2001). Impactos ambientais em áreas urbanas–teorias, conceitos e métodos de pesquisa. Em A. J. GUERRA, *Impactos ambientais urbanos no Brasil*, 19-45. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Comisión Europea. (2014). Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones*, 1-17. Bruselas. Acesso em 16 de Maio de 2020, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&format=PDF
- Ehrlich, P. & Holdren, J. (1971). Impact of population growth. *Science, 171*(3977), 1212-1217. Acesso em 16 de Maio de 2020, https://www.jstor.org/stable/1731166

- Ely, A. (1998). *Economia do meio ambiente.* Fundação de Economia e Estatística. Siegfried Emanuel Coser, Porto Alegre.
- Fenker, E. (2011). Impacto Ambiental ou Dano Ambiental. *Ambiente Brasil*. Acesso em 15 de Maio de 2020, http://www.academia.edu/download/5426198/reflexoes_10.pdf
- Grossman, G. & Krueger, A. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 353-377. https://doi.org/10.2307/2118443
- Hammes, V. (2012). *Julgar - Percepção do impacto ambiental.* Embrapa, Brasilia.
- Lopes de Sá, A. (2012). Modelos contábeis e gestão da capacidade lucrativa. *Contabilidad y Auditoría, 20*, p. 18. Acesso em 12 de Maio de 2020, http://ojs.econ.uba.ar/index.php/Contyaudit/article/view/135
- Melgarejo Moreno, J. (2019). Agua y economía circular. Em: J. Melgarejo Moreno, *Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad,* 27-52. Universitat d'Alacant, Alicante. https://doi.org/10.14198/Congreso-Nacional-del-Agua-Orihuela-2019
- Pinto, A. (2003). *O direito paisagístico e dos valores estéticos: efetividade e o dano moral coletivo.* Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Porter, M. (1989). *Vantagem competitiva: Criando e Sustentando um Desempenho Superior.* Campus, Rio de Janeiro.
- Prahalad, C. & Ramaswamy , V. (2004). Co-creation experiences: The next practice in value creation. *Journal of interactive marketing*, 5-14. Acesso em 12 de Maio de 2020, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/dir.20015
- Rosa, E. & Dietz, T. (1998). Climate Change and Society: Speculation, Construction and Scientific Investigation. *International Sociology, 4*(13), 421-455. https://doi.org/10.1177/026858098013004002
- Sabalza Hernáez, A. (2003). *La consagración jurídica del paisaje a través del Convenio Europeo.* IVAP, Oñati.
- Shafik, N. & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence. *Policy Research Working Paper Series, 904*. Acesso em 16 de Maio de 2020, http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/1992/06/01/000009265_3961003013329/Rendered/PDF/multi_page.pdf
- Shi, A. (2003). The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: evidence from pooled cross-country data. *Ecological economics, 44*(1), 29-42. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00223-9
- Timmermans, F. (11 de Março de 2020). *European Commission.* Fonte: European Commission: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_20_420/IP_20_420_EN.pdf
- Vanclay, F. (2002). Conceptualising social impacts. *Environmental impact assessment review*, 183-211. https://doi.org/10.1016/S0195-9255(01)00105-6
- Wathern, P. (2013). *Environmental impact assessment: theory and practice.* Routledge, Londres.
- York, R., Rosa, E. & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological economics, 46*(3), 351-365. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5

DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA HIDROLÓGICA. DESARROLLO DE UN MODELO METODOLÓGICO PARA LA GESTIÓN RESILIENTE DE LAS INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS URBANAS

Ramón Egea Pérez
Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A., EMUASA, España

Francisco José Navarro González
Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Alicante, España

RESUMEN

La caracterización de la amenaza hidrológica y los factores que intervienen en la potenciación de sus efectos adversos requiere de un análisis holístico y relacional en un marco zonal compatible con una definición vinculada a la tipología de infraestructura critica a analizar desde el punto de vista de la gestión de riesgos. Los parámetros críticos y los factores de amenaza hidrológica se vinculan y ponderan en base a un estudio previo de las variables meteorológicas, hidrológicas, geomorfológicas y geológicas representativas de la zona de estudio, con posible afectación potencial de la infraestructura específica. La vinculación de la amenaza hidrológica microzonal, y la tipología y caracterización (física y operativa) de la infraestructura genera un modelo de comportamiento de esta que permite obtener el nivel riesgo específico de cada infraestructura.

Se desarrolla un proceso secuencial de análisis matemático obteniendo diferentes niveles de valores, estructurados en intervalos siguiendo diferentes funciones matemáticas características, y que mediante algoritmos definen los valores de cálculo de los factores de amenaza obteniendo a través de la formulación propuesta en la metodología, la amenaza hidrológica final a nivel microzonal.

1. INTRODUCCIÓN

La definición y caracterización de la amenaza hidrológica, A_H resulta esencial para el cálculo del riesgo hidrológico, R_H caracterizado por la susceptibilidad, S_H y la capacidad de respuesta o resiliencia de la infraestructura hidráulica de análisis, en un marco integral donde las dependencias de los diferentes indicadores que definen dichas infraestructuras hidráulicas se ven influenciados en mayor o menor grado, por los factores críticos y otros factores complementarios de la amenaza hidrológica.

Dada la variabilidad climática, sobre todo en zonas semiáridas como es el Sureste de España, resulta fundamental, analizar los factores que inciden en el potencial de la amenaza hidrológica previsible, permitiendo así establecer los valores de los parámetros críticos que la definen para una zona específica. Es por ello por lo que, para la seguridad de las infraestructuras críticas y su gestión sostenible, una metodología de análisis y calculo como la propuesta en esta investigación resulta del todo adecuada y necesaria. En esta investigación, se desarrolla el proceso metodológico que caracteriza la amenaza hidrológica, A_H, la cual se define como la intensidad esperada que puede provocar daño ante una eventual exposición, condicionada por los factores específicos de la zona. Esta potencial amenaza define zonas con distintos valores esperados de afectación, se mide en

unidades críticas $[Uc_H]$. En general cualquier tipo de amenaza se caracteriza por un parámetro crítico, P_{ph}, definido por intervalos de valores correlacionados según magnitud, frecuencia y grado de afectación a la infraestructura específica, en este caso la hidráulica (caracterización física y operativa).

$$A_H[Uc_H] = Pp_h[Uc_H] \cdot \prod_{n=1}^{N(h)} Fp_{hn,\ cálculo} \qquad (1)$$
$$\text{Siendo, } AH_0[Uc_k] : \Leftrightarrow Pp_h[Uc_H]$$

La Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia, en el ámbito del desarrollo aplicativo del modelo metodológico de gestión de las infraestructuras hidráulicas urbanas para hacer frente a las amenazas naturales específicas (A_k), en este caso las hidrológicas (A_H), así como las geológicas (A_G), está avanzando en la definición de un modelo metodológico que permite la caracterización integral de los parámetros críticos y los factores de amenaza, en este caso, la hidrológica en cada zona geográfica, vinculados a la tipología y a las características físicas y operativas de la infraestructura específica.



Figura 34. Diagrama de flujo del desarrollo analítico de la amenaza específica, (A_k). Aplicación a las infraestructuras hidráulicas urbanas. Fuente: elaboración propia.

La integración del modelo matemático de análisis de la amenaza hidrológica que se está desarrollando y vinculado con la metodología de análisis de riesgo de las infraestructuras hidráulicas propuesta, Egea (2018) "*Investigación sobre modelos de gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas resilientes en relación con los riesgos hidrológicos y geológicos"*, permite definir la capacidad de respuesta (resiliencia) de la infraestructura hidráulica urbana a partir de un enfoque holístico, y en un entorno de cambio climático.

El desarrollo de la amenaza específica, A_k y su definición analítica se realiza a nivel microzonal y según las características físicas y operativas de la infraestructura específica.

El planteamiento de análisis para cualquier tipo de amenaza, *k,* sería el que se describe a continuación considerando los valores máximos iniciales de cada uno de los factores de amenaza, así como su valor conjunto obtenido como el producto de los valores de los factores de amenaza de cálculo considerados se ha estimado que toma valores dentro del intervalo de variación entre ≥1 y <2. A partir de estos límites aplicados a la ecuación (1), se obtiene una condición para el valor del parámetro critico de amenaza especifica P_{pk} o el valor inicial A_{k0} ,representativo de dicha amenaza específica:

$$P_{pk} : \Leftrightarrow A_{k0} > 50\%\ A_k \qquad (2)$$

Además, se establece la condición de que el valor del producto de factores de amenaza de cálculo $\prod F_{pk,n,cálculo}$ representa $< 0{,}50 \cdot A_{k0}$:

$$\prod F_{pk,n,cálculo,máx.} = \frac{1}{P_{pk,máx.}} < 50\%\ A_{k0,máx.} \qquad (3)$$

Por otro lado, dado que $\prod F_{pk,n,cálculo} \leq \prod F_{pk,n,máx.cálculo} = \left(F_{pk,n,máx.cálculo}\right)^3 < 2$, los valores máximos de los factores de amenaza y sus porcentajes respecto al parámetro critico de amenaza vienen dados por:

$$F_{pk,n,máx.cálculo} \leq 1{,}2599 \qquad (4)$$

Dado que, $\prod F_{pk,n,cálculo} = (1{,}2599)^3 < 2$, desarrollando la expresión de la amenaza, A_k, se obtienen los intervalos y valores máximos, como se muestra a continuación.

$$A_k = A_{k0} \cdot \prod_{n=1}^{n=m} F_{pk,cálculo} \leq 1 \qquad (5)$$

Pues el intervalo de valores de la amenaza A_k es [0 1]. El producto de factores de amenaza representativos del parámetro crítico de amenaza, P_{pk}, puede expresarse también como la suma del parámetro critico de amenaza y un porcentaje de esta, respecto al parámetro crítico de amenaza, $\Delta\ Ak_0$, es decir,

$$A_k = A_{k0} + \Delta\ Ak_0 \qquad (6)$$

Pasando a denominarse el parámetro crítico, P_{pk}, como A_{k0}, tal y como se ha descrito inicialmente por lo que $P_{pk} = A_{k0}$ y que deberá cumplir la condición indicada $\Delta\ Ak_0 < 0{,}50 \cdot A_{k0}$.

La implantación esta metodología en desarrollo resulta esencial, para la gestión de las infraestructuras criticas hidráulicas urbanas, adaptando las mismas a las exigencias del nuevo marco normativo, que prevé mayor protección de estas, al tiempo que persigue su adaptación al cambio climático y sus efectos anómalos, en particular, en regiones semiáridas como es el caso de la ciudad de Murcia, como se describe en Egea (2018).

2. OBJETIVOS

A continuación, se resumen los objetivos principales propuestos:

- Propuesta metodológica para el análisis y obtención de la amenaza hidrológica en infraestructuras críticas y servicios esenciales.
- Desarrollo analítico de los parámetros críticos y de los factores de amenaza hidrológica y su aplicación al análisis de riesgos.

1. Definición, e implantación de la metodología propuesta en la caracterización de indicadores de resiliencia de las infraestructuras hidráulicas.
2. Establecimiento de un modelo analítico para la caracterización de la amenaza hidrológica a nivel microzonal y vinculado a la caracterización física y operativa de las infraestructuras críticas, y aplicación especificas a las infraestructuras hidráulicas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Estado del arte

Existen diversas técnicas o metodologías de análisis del riesgo de inundación, que proponen indicadores para la determinación de los parámetros representativos de la amenaza hidrológica y la vulnerabilidad de las infraestructuras y del territorio. Tal es el caso de la metodología utilizada por FEMA-HAZUS (2012) para la determinación del riesgo de inundación, o PATRICOVA (2015), una metodología de prevención del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana, que incorpora los postulados de Directiva Europea de prevención del riesgo de inundación EU (Directiva 2007/60/C), incide en la evaluación de daños potenciales en la infraestructura mediante variables hidráulicas (calado y velocidad). Barbat y Cardona (2003), Cardona (2004, 2006), Cardona et al. (2004) y

Carreño (2005) plantean el análisis del riesgo mediante indicadores, aunque en la determinación de la amenaza específica no se contempla la integración de los diversos factores de amenaza en el parámetro crítico. (diferenciación microzonal).

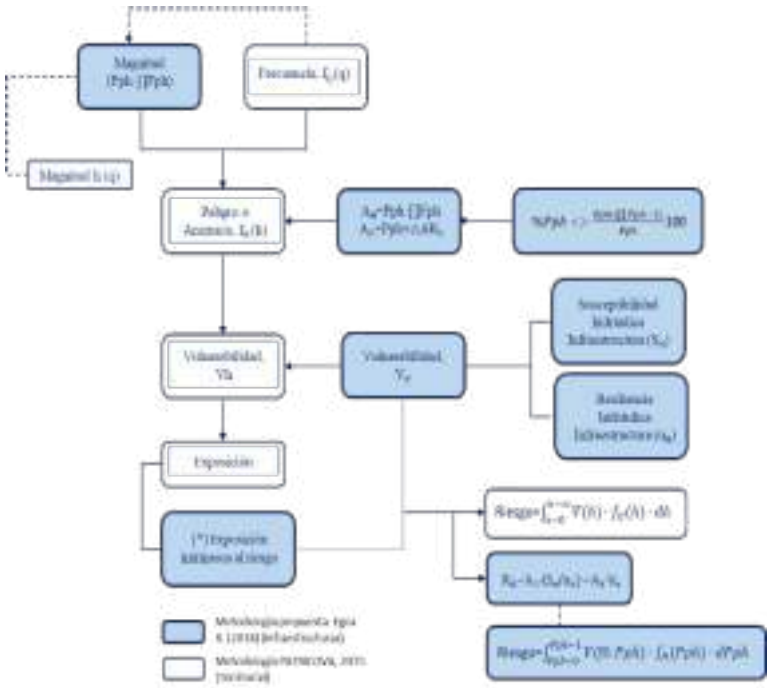


Figura 2. Análisis comparativo de la secuencia de análisis de riesgo hidrológico según la metodología de análisis PATRICOVA (2015) y la metodología propuesta Egea (2018). Fuente: elaboración propia.

3.2. Metodología propuesta

La amenaza hidrológica, y los factores de amenaza que completan con su influencia en la potenciación del parámetro critico que define a aquella, se vinculan de manera holística generando escenarios potenciales específicos para cada área o microzona representativa donde se localiza la infraestructura a analizar.

Los factores que intervienen en la potenciación de sus efectos requieren de un análisis holístico y relacional en un marco zonal compatible con una definición vinculada a la tipología de infraestructura critica a analizar desde el punto de vista de la gestión de riesgos. Los parámetros críticos y los factores de amenaza hidrológica se vinculan y ponderan en base a un estudio previo de las variables meteorológicas, hidrológicas, geomorfológicas y geológicas representativas de la zona de estudio, con posible afectación potencial de la infraestructura específica.

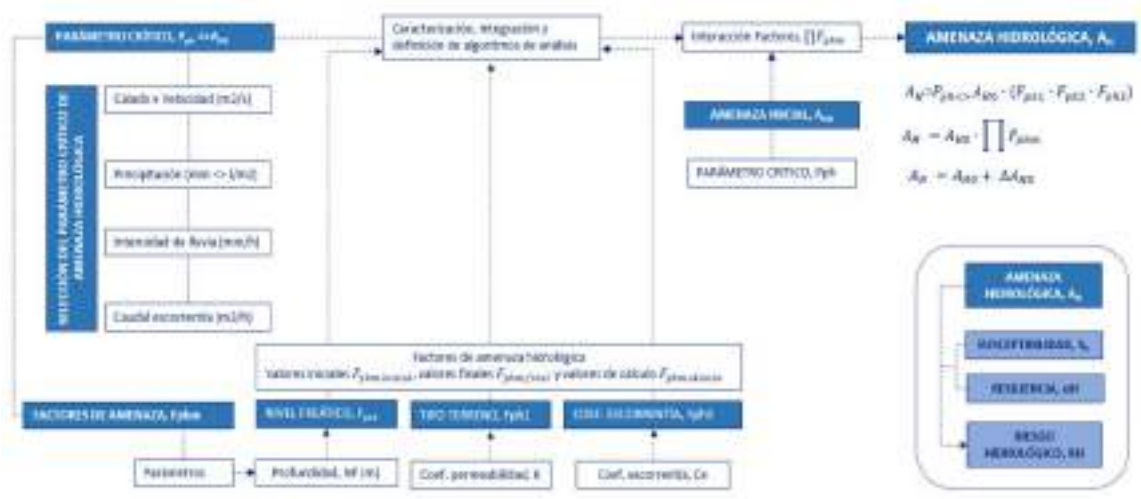


Figura 3. Esquema conceptual del desarrollo de la metodología de análisis de la amenaza hidrológica, A_H. Fuente: elaboración propia.

La infraestructura, además del parámetro crítico y los factores de amenaza seleccionados, vendrá definida por su grado de vulnerabilidad. La amenaza hidrológica (A_h), se define como la intensidad esperada que puede provocar daño ante una eventual exposición, condicionada por los factores específicos de la zona. Esta potencial amenaza define zonas con distintos valores de afectación esperados, se mide en unidades críticas $[Uc_h]$ propias de la amenaza determinada por un parámetro crítico y factores de amenaza o peligro, como se ha introducido en la ecuación (1).

$$A_H[Uc_H] = Pp_h[Uc_H] \cdot \prod_{n=1}^{N(h)} Fp_{hn,\ cálculo} = Pp_h[Uc_H] \cdot (Fp_{h_1} \cdot Fp_{h_2} \cdot Fp_{h_3}) \qquad (7)$$

La ecuación (7) presenta los factores de amenaza (Fp_{kn}), la amenaza k, y el producto de los $N(k)$ factores de amenaza (Fp_{kg}), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico. La ecuación (8) representa el riesgo específico para una amenaza k y una tipología i de infraestructura.

$$R_{ki}\ [Daño] = A_k[Uc_k] \cdot V_{ki}[Daño \cdot {Uc_k}^{-1}] \qquad (8)$$

Siendo, V_{ki} la vulnerabilidad de la infraestructura ante la amenaza hidrológica, y R_{ki} el riesgo hidrológico de dicha infraestructura, i. (Egea, 2018).

3.3. Desarrollo metodológico

Es a partir de la definición de la amenaza específica, en base al parámetro/s critico/s de dicha amenaza y de los factores de amenaza microzonales o locales que se inicia el desarrollo de la metodología de análisis de amenaza hidrológica descrita.

- **Factor/es críticos de amenaza, P_{pkn}**

Seleccionado el/los factores/es críticos de amenaza, P_{pk} y en base a la conversión de los parámetros criticos de amenaza (unidades específicas de amenaza) se obtiene el índice, o valor representativo en tanto por uno, según se defina.

- **Factores de amenaza, F_{pkn}**

Los valores propuestos que caracterizan cada uno de los factores de amenaza según amenaza específica, se obtienen en base a las diversas investigaciones relacionadas y considerando un modelo de evolución, donde los valores de los intervalos dados a cada factor de amenaza siguen una evolución logarítmica según la formulación propuesta, y en base a diversas investigaciones analizadas en el área de los riesgos naturales, FEMA, (2012); RISK-UE, (2004); CARDONA, O., HURTADO, E.J.,

DUQUE, G., MORENO, A., CHARDON, A., y VELÁSQUEZ, S. (2004); otras, así como en episodios catastróficos de origen natural ocurridos.

$$F_{pkn1} = 1 + \left(F_{pkn0} / \sum_{n=1}^{n=m} F_{pk}\right) \quad (9)$$

$$F_{pkn2} = Ln\left(F_{pkn1}/F_{pkn,min,inicial}\right) \cdot \left(F_{pkn1}/F_{pkn,min,inicial}\right) \quad (10)$$

El valor de cálculo del factor de amenaza, $F_{pkn,cálculo}$ se define como $F_{pkn,cálculo} = F_{pkn2}$, y el producto de los factores de amenaza de cálculo, $\prod_{n=1}^{n=m} F_{pkn,cálculo}$ que corrigen el parámetro critico de amenaza, P_{pkn} o amenaza inicial, A_{k0} , y se podría descomponer como:

$$F_{pk1,cálculo} \cdot F_{pk2,cálculo} \cdot F_{pk3,cálculo} \cdot \ldots\ldots\ldots\ldots F_{pkn,cálculo} = \prod F_{pk,n,cálculo} \quad (11)$$

- **Amenaza, A_k**

Como se ha indicado, la amenaza caracterizada por el parámetro critico de amenaza, P_{pk} corregida por los factores de amenaza microzonales o localizados es igual a:

$$A_k = A_{k0} \cdot \prod F_{pk,n,cálculo} \quad (12)$$

Los valores iniciales de los factores de amenaza variarán entre un valor mínimo de 1 y un valor máximo de 1,99 , y el valor de la amenaza inicialA_{k0} , variará entre 0 y 1. El valor final resultante del producto de la amenaza inicial A_{k0}, y del producto de los factores de amenaza $\prod F_{pk,n,cálculo}$ varía entre 0,001 y 1, ya que $0 < A_{k0} \leq 1$, y para evitar indeterminaciones y minimizar el error, ε, se fija dicho valor mínimo umbral en 0,001 ($A_{kmín.}$). El umbral máximo del producto de los factores de amenaza de cálculo $\prod F_{pk,n,cálculomáx.}$ <2 y el valor máximo de cada uno de los factores de cálculo de amenaza $F_{pk,n,cálculomáx.}$<1,26, según la ponderación inicial realizada. Siendo el valor umbral mínimo de la amenaza inicial o lo que es lo mismo, el parámetro critico de amenaza de $A_{k0mín.}$: ⇔ $Ppk > 0{,}50 \cdot A_k$, como se establece en la ecuación (2).

Por otra parte, a partir de la condición $\prod F_{pk,n,cálculomáx.}$ <2 y la ecuación (2) se puede demostrar que la cota superior para el incremento de amenaza inicial es ΔA_{k0}<0,50 ·A_k, ya que, el valor conjunto de los factores de amenaza o su porcentaje respecto al valor de la amenaza, no podrá superar el valor del parámetro critico de amenaza, pues el parámetro critico vendría a caracterizar a dicha amenaza, y por lo tanto debe tener un mayor peso en la definición de la amenaza, complementado dicho valor por los demás factores de amenaza.

En el caso de la amenaza hidrológica, y dada la ponderación establecida de valores de los factores de amenaza, el valor máximo del parámetro crítico de amenaza hidrológica, Pph, corresponde a 0,8133 o lo que es lo mismo al 81,33% del valor de la amenaza hidrológica, A_H, siempre y cuando el valor de los factores sea máximo (0,1867), incrementándose el valor del parámetro crítico, P_{ph} con la disminución de los factores de amenaza, $F_{phn,cálculo}$ hasta alcanzar un valor 1 de la A_H., tal y como se muestra en la Figura 4.

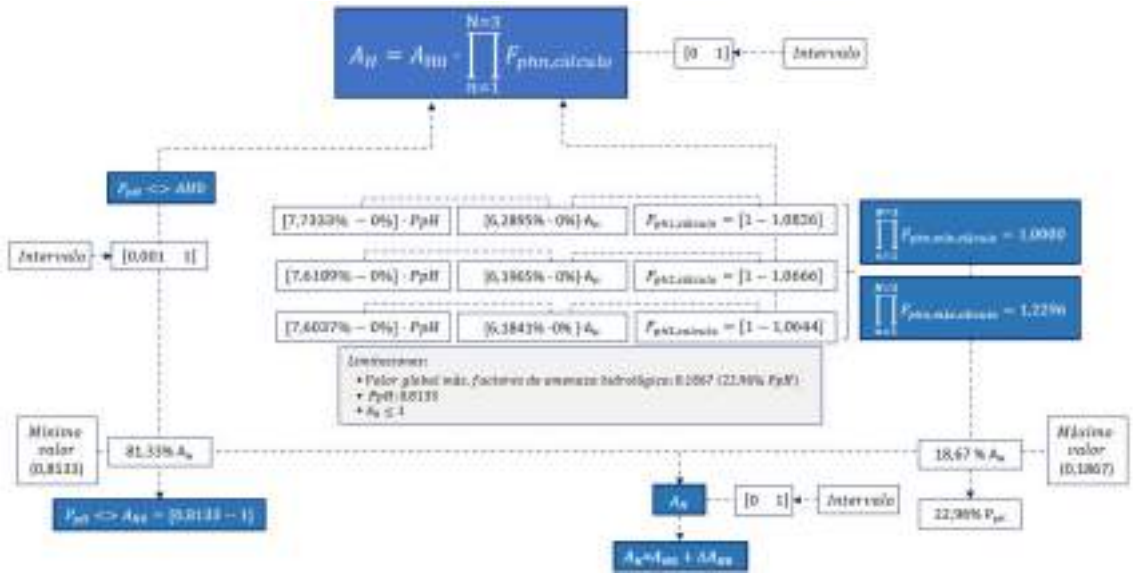


Figura 4. Modelo metodológico Amenaza hidrológica, A_H. Valores máximos y mínimos del Parámetro crítico y de los Factores de amenaza, Fph. Fuente: elaboración propia.

A continuación, muestra el desarrollo analítico de los factores de amenaza hidrológica en sus diferentes estadios.

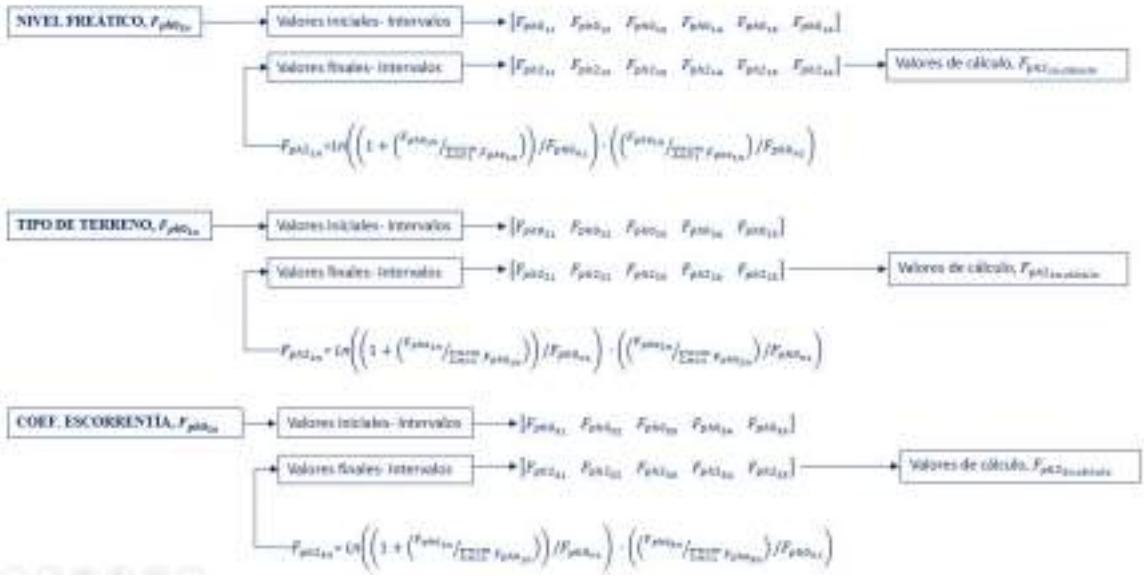


Figura 5. Desarrollo analítico de los Factores de amenaza, Fph. Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura, se estructuran y se clasifican los diferentes valores e intervalos del factor crítico y los factores de amenaza hidrológica. Es a partir de dichos valores de los parámetros que se establecen los valores de los índices a través del análisis de la evolución del parámetro critico de amenaza como de los factores de amenaza según las investigaciones especificas analizadas como FEMA (2012) y Cardona et al. (2004), y otras vinculadas. En el caso de los factores de amenaza se han propuesto funciones características, siguiendo una secuencia de cálculo establecida (valores iniciales, valores finales y valores de cálculo).

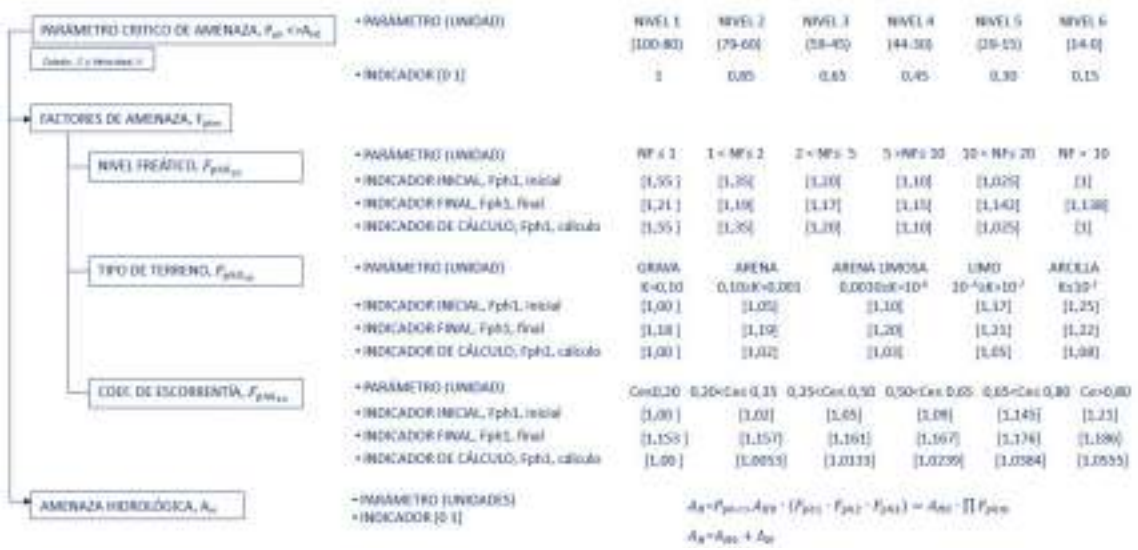


Figura 6. Esquema de análisis del parámetro crítico y de los Factores de amenaza hidrológica, P_{ph}, F_{ph}. Fuente: elaboración propia.

4. APLICACIÓN METODOLÓGICA

Inicialmente, se procede a seleccionar el parámetro crítico o factor de amenaza que en mayor medida (>50%A_H) define a esta en la zona de estudio, y basada dicha elección en las investigaciones existentes sobre análisis de la amenaza hidrológica, y el conocimiento de eventos de inundación acaecidos durante los últimos años. Para ello, se consideran entre otras características la hidrología, la climatología imperante en la zona de estudio y otros factores físicos relativos a la geomorfología, y la geología microzonal.

En el caso de seleccionar como parámetros críticos el calado y la velocidad del flujo de escorrentía, se sigue la metodología incluida en el Plan de Acción Territorial de la Comunidad Valenciana (PATRICOVA, 2015) y la metodología de la Agencia Catalana del Agua, ACA (2004), adaptadas a la presente investigación.

Denominación	Nombre del factor	Descripción
Pp_{H1}	Calado o altura de la lámina agua (C)	Altura que alcanza el flujo de agua generado por la escorrentía superficial, midiéndose en metros (m).
Pp_{H2}	Velocidad de flujo (V)	La velocidad que genera el flujo de la escorrentía en la superficie de la cuenca hidrográfica (m/s).
Pp_{H3}	Caudal máximo escorrentía (Qmáx.)	Máximo caudal de escurrimiento que fluye por la cuenca hidrográfica o zona de estudio (m3/s).
Pp_{H4}	Intensidad precipitación I(mm/h)	La intensidad de precipitación puede incrementar el peso específico del terreno susceptible a deslizamiento.

Tabla 1. Parámetros críticos de amenaza hidrológica. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7, se indican los niveles de peligrosidad hidrológica (Inundación) en base a los parámetros de velocidad (v), calado (c) y el producto (c·v).

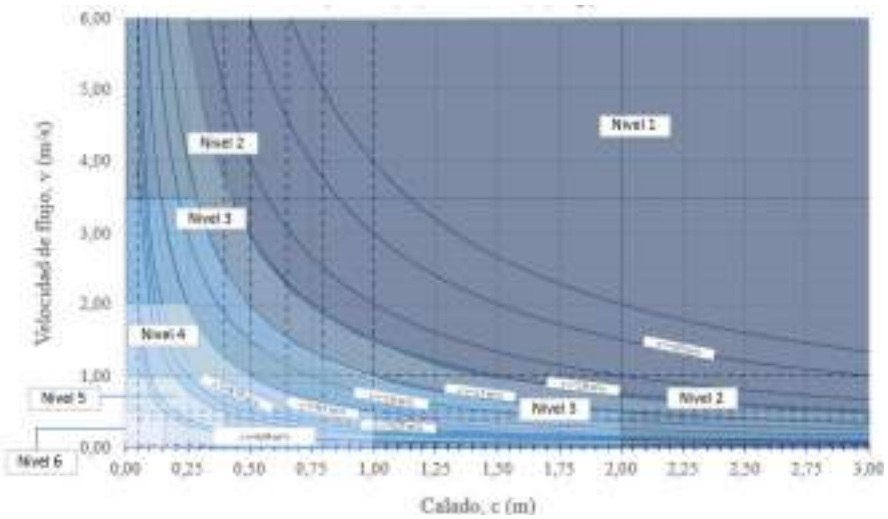


Figura 7. Niveles de peligrosidad hidrológica y valores de los parámetros críticos de amenaza hidrológica (P_{phm}). Fuente: elaboración propia.

Como se ha indicado a partir de la selección del parámetro crítico hidrológico, en ese caso el calado y la velocidad máxima del flujo, se analizan los parámetros de amenaza hidrológica propuestos en base al análisis de la información recopilada y el potencial de afectación según la localización.

Denominación	Nombre del factor	Descripción
Fp_{H1}	Nivel freático, N.F.	Profundidad napa subterránea, mide la capacidad de infiltración.
Fp_{H2}	Tipología de terreno, K	Tipología del terreno, naturaleza o composición, impermeabilidad, porosidad, y coeficiente de escorrentía
Fp_{H3}	Pendiente topográfica terreno, I	Pendiente terreno determina altura y velocidad del escurrimiento.
Fp_{RH4}	Coeficiente de escorrentía Ce	La cobertura vegetal del terreno (infiltración del terreno, velocidad deslizamiento, la velocidad desagüe, y otras magnitudes

Tabla 2. Definición y descripción de factores de amenaza hidrológica. Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología propuesta, se aplica a cualquier tipo de infraestructura específica, aunque en este caso se propone su aplicación específica en una planta tipo de tratamiento de agua potable como uno de los elementos más críticos de la infraestructura de abastecimiento de agua potable. Es la amenaza hidrológica una de las más representativas que caracteriza el riesgo en el Sureste de España, por lo que se propone esta zona para implementar el análisis de amenaza desarrollado en esta investigación, fijando el parámetro crítico tras una selección previa de los parámetros críticos más representativos de la amenaza hidrológica en base a las diversas investigaciones analizadas como, PATRICOVA, (2015), que incorpora los postulados de la Directiva Europea de prevención del riesgo de inundación EU (Directiva 2007/60/C), incidiendo en la evaluación de daños potenciales en la infraestructura territorial, mediante variables hidráulicas (calado y velocidad, intensidad de lluvia, caudal de escorrentía), así como los factores de amenaza hidrológica con mayor incidencia local y con mayor influencia en la localización de la infraestructura de estudio.

A partir de los parámetros críticos y factores de amenaza definidos se seleccionan aquellos que en base a un análisis preliminar de la amenaza hidráulica zonal y las investigaciones referenciadas se consideren, recomendando un máximo de 3 factores de amenaza hidrológica.

Los parámetros críticos de amenaza hidrológica que en este caso se analizan y que se consideran en el análisis preliminar, son los siguientes:

- Calado o altura de la lámina de agua (C), en metros.
- Velocidad de flujo de escorrentía (V), en m/s.
- Caudal máximo de escorrentía (Qmáx.), en m3/s.

De otra parte, los factores de amenaza hidrológica evaluados y que pueden incidir en la magnitud de la amenaza son:

- Nivel freático, N.F., $F_{ph0_{1n}}$.
- Tipología de terreno, K, $F_{ph0_{2n}}$.
- Coeficiente de escorrentía, Ce, $F_{ph0_{3n}}$.
- Intensidad de Precipitación I_{24} (mm), $F_{ph0_{4n}}$.
- Pendiente topográfica, I (%), $F_{ph0_{5n}}$.

En este caso de análisis, se seleccionan los siguientes parámetros críticos y factores de amenaza hidráulica:

- Parámetro crítico: Calado y velocidad de flujo de escorrentía (m2/s).
- Factores de amenaza hidrológica:
  - Nivel freático (m).
  - Tipología de terreno, permeabilidad (K).
  - Coeficiente de escorrentía, Ce.

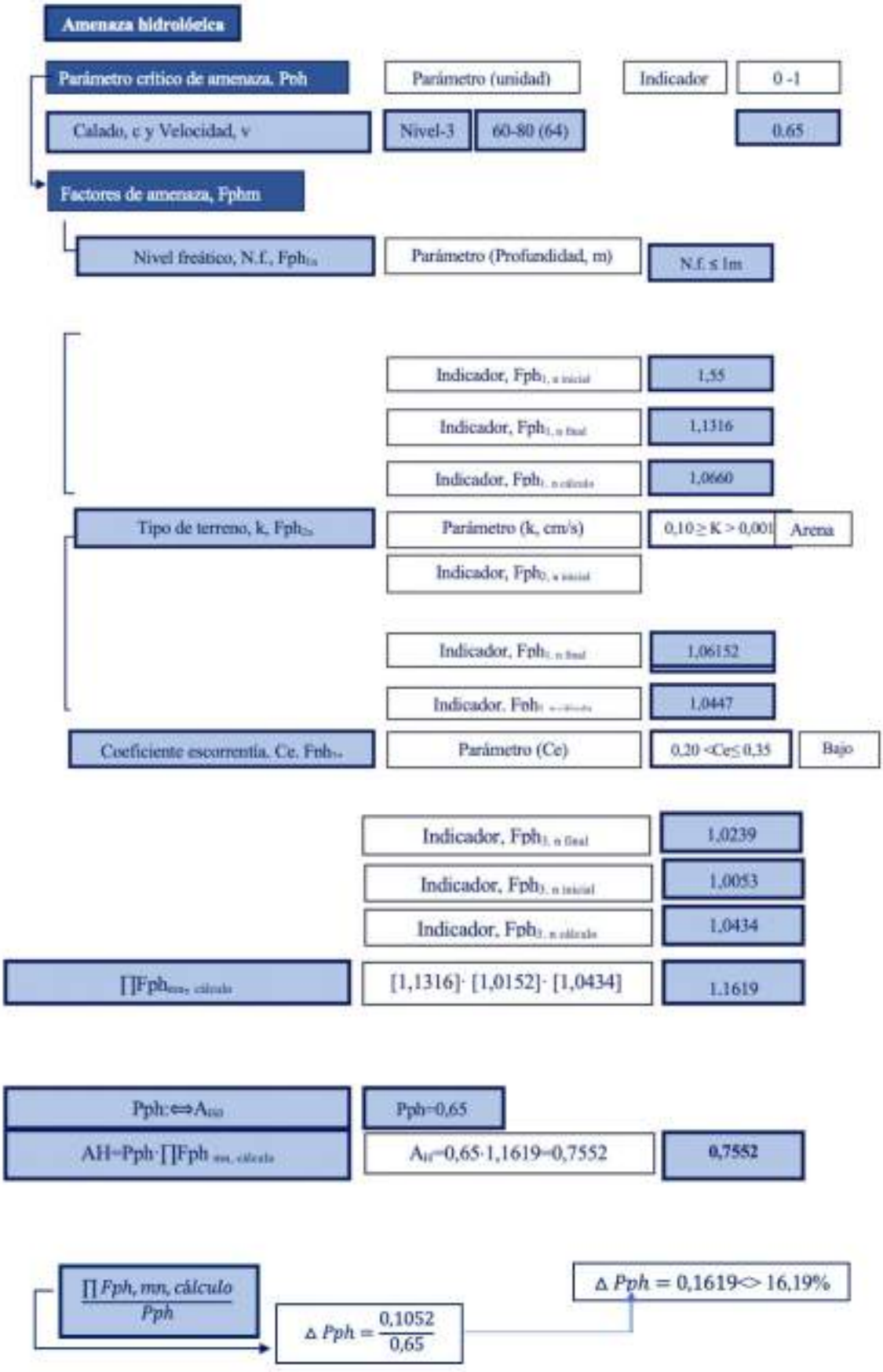


Figura 8. Metodología de análisis amenaza hidrológica. ETAP Fuente: elaboración propia.

Es decir, la amenaza hidrológica microzonal con afectación a la infraestructura hidráulica de ejemplo (Estación de tratamiento de agua potable, ETAP) tiene un valor total definido por el parámetro critico representativo de la amenaza hidrológica, Pph=0,65 y los factores de amenaza hidrológica más representativos de la zona, Fph, en este caso la profundidad del nivel freático somero, la tipología y permeabilidad del terreno (arena y permeabilidad media), y coeficiente de escorrentía, Ce (0,20 <Ce≤ 0,35, bajo), obteniendo un valor de $\mathbf{A_H=0,7552}$. A continuación, se representan los resultados en la Figura 9:

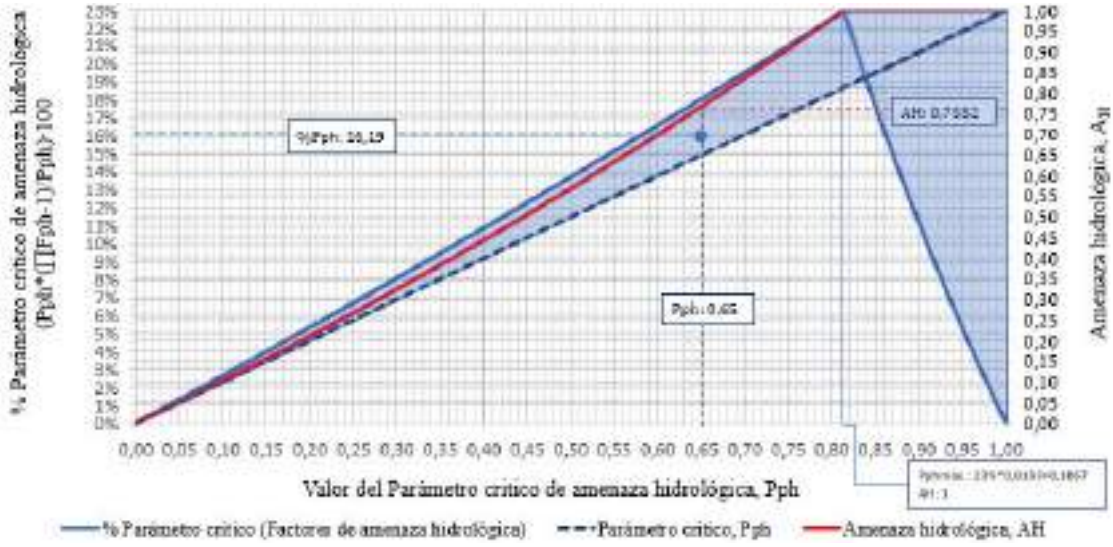


Figura 9. Evolución de la amenaza hidrológica, parámetro crítico y factores de amenaza, caso de ejemplo ETAP. Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

La definición de la amenaza hidrológica basada en la selección del parámetro crítico más representativo de la zona de implantación de la infraestructura específica, así como la integración en este de los factores de amenaza adicionales confiere una gran robustez al análisis, pues es través de funciones de características que definen la evolución de estos factores de amenaza como se obtiene una mejor definición y evolución de la amenaza. La mejor definición de la amenaza se traduce en un análisis del riesgo más preciso.

Además de la precisa caracterización de la amenaza hidrológica, el proceso de caracterización de la infraestructura implica la integración de todas las variables y parámetros que definen a la misma, aplicando una estructuración lógica de parámetros, indicadores e índices.

El desarrollo de esta metodología holística que integra aquellos variables representativas permite una mejor gestión del riesgo, estableciendo escenarios potenciales y la mejora de protocolos de actuación, así como la planificación de inversiones que permitan incrementar la fiabilidad y la mejora del grado de sostenibilidad de las infraestructuras críticas.

REFERENCIAS

- Agencia Catalana del Agua (2004). *Guía técnica. Recomendaciones técnicas para el diseño de infraestructuras que interfieren con el espacio fluvial*, ACA, enero, 2004.
- Barbat, A.H. y Cardona, O. D. (2003). *Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level.*

- Cardona, O.D. (2004). *The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. In: Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People.* London (UK).
- Cardona, O. (2006). A System of Indicators for Disaster Risk Management in the Americas. *In: Measuring Vulnerability to Hazards of Natural Origin: Towards Disaster Resilient Societies.* J. Birkmann, United Nations University Press, Tokyo, Japón.
- Cardona, O., Hurtado, E. J., Duque, G., Moreno, A., Chardon, A. y Velásquez, S. (2004). *Dimensionamiento relativo del riesgo y de la gestión: Metodología utilizando indicadores a nivel nacional. Programa BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos.* Universidad Nacional de Colombia, Manizales. http://idea.unalmzl.edu.co
- Carreño, M. O. (2007). A disaster risk management performance index. *Journal of Natural Hazards*, 41(1), 1-20.
- Egea, Ramón (2018). *Investigación sobre modelos de gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas resilientes en relación con los riesgos hidrológicos y geológicos*. Universidad de Alicante (España) y Universidad de Chile, Santiago (Chile). Tesis doctoral.
- FEMA (2012). *Multi-hazard loss estimation methodology-Flood. Model-Hazus-MH. Technical Manual. FEMA.*
- Gracia, A., Godé, L., Crego, E., Arrabal, M. A., Guirado, V., García, G., Lobera, C., González, S. y Martínez, E. (2014). *Riesgos y cuantificación de daños por inundación.*
- IDEA. (2005). *Indicadores para la Gestión de Riesgos, Operación* BID ATN/JF-7907-RG. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. http://idea.unalmzl.edu.co. Manizales
- Generalitat Valenciana (2015). *PATRICOVA: Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana.*
- RISK-UE. (2004). *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings.*

EFECTO SOBRE LAS INUNDACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN LA RAMBLA DEL ALBUJÓN

Adrián López Ballesteros
alopez6@ucam.edu
https://orcid.org/0000-0001-6350-5653

Javier Senent Aparicio
jsenent@ucam.edu
https://orcid.org/0000-0002-1818-5811

Julio Pérez Sánchez
jperez058@ucam.edu
https://orcid.org/0000-0002-2615-6076

Patricia Jimeno Sáez
pjimeno@ucam.edu
https://orcid.org/0000-0003-4733-7236

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Murcia, España

RESUMEN

Las prácticas de gestión agrícola (BMP, por sus siglas en inglés) suponen una solución eficaz en cuanto a la mejora de la calidad de las aguas, ya que reducen la cantidad de sedimentos y nutrientes presentes en las mismas. Sin embargo, estas BMP también pueden presentar beneficios adicionales, tales como, la reducción de los caudales máximos y por tanto la reducción del daño causado por las inundaciones. En este estudio se trata de evaluar los posibles efectos de las BMP sobre las inundaciones en zonas de agricultura intensiva. Para ello, se ha llevado a cabo la modelización hidrológica y calibración mediante el modelo SWAT de la cuenca de la rambla de Albujón, ubicada en el Campo de Cartagena. La eficacia de la BMP de plantación de cultivos siguiendo las curvas de nivel, propuestas en la Ley 1/2018, ha sido evaluada en términos de reducción de caudales máximos diarios. Los resultados indican una importante reducción de las avenidas extremas, lo cual demuestra que la implementación de cultivos siguiendo las curvas de nivel, además de la mejora la calidad de las aguas, reduce el impacto de las inundaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas con un alto grado de antropización suelen mostrar graves problemas ecológicos y medioambientales. Para intentar reducir sus efectos se llevan a cabo normativas de control y prevención, la cuales suelen incluir una serie de medidas orientadas a la gestión de los usos agrícolas (CARM, 2018). Aunque el principal objetivo de estas prácticas de gestión agrícola (BMP) suele ser mejorar la calidad de las aguas (Bosch et al., 2013), algunas de ellas pueden tener efectos adicionales tales como: la reducción de la escorrentía superficial o el aumento de la infiltración. Dichos efectos adicionales se traducen en una reducción de los caudales máximos y por tanto una

reducción en el impacto de las inundaciones (Antolini et al., 2019).

La modelización hidrológica de la cuenca de estudio seleccionada se ha llevado a cabo mediante SWAT (Soil and Water Assessment Tool) incluyendo en el modelo las prácticas agrícolas y el programa de riego de los cultivos. Se ha seleccionado como zona de estudio la cuenca de la rambla del Albujón, debido a su alto grado de explotación agrícola. Sin embargo, la presencia de una agricultura intensiva en la cuenca de la rambla del Albujón, unido al hecho de que su cauce principal no presenta caudales continuos a lo largo de todo el año, ha provocado que la existencia de datos de aforo sea escasa o nula e imposibilite la correcta calibración de los modelo hidrológicos mediante datos de caudal. Como consecuencia, para afrontar este inconveniente se ha optado por la calibración del modelo mediante datos de evapotranspiración real satelital obtenidos de GLEAM.

El principal objetivo de este estudio consiste en evaluar el impacto de la plantación de los cultivos siguiendo las curvas de nivel sobre la reducción de las inundaciones. Para lograrlo se han seguido los siguientes pasos: (1) Modelización hidrológica de la cuenca de la rambla del Albujón mediante el modelo SWAT; (2) Calibración y validación del modelo SWAT mediante datos de evapotranspiración satelital; (3) Simulación de los distintos escenarios propuestos en SWAT; y (4) Cuantificación y evaluación los caudales máximos diarios de los distintos escenarios simulados.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de Estudio

La zona de estudio seleccionada es la cuenca hidrográfica de la rambla del Albujón, la cual se encuentra ubicada dentro de denominado Campo de Cartagena. El Campo de Cartagena es uno de los principales productores de cultivos hortícolas en Europa (Velasco et al., 2006) y se caracteriza por su agricultura intensiva y su régimen de lluvias torrenciales (León et al., 2017). Cabe destacar que en el Campo de Cartagena no existen cursos permanentes de agua. En las épocas de lluvia, que aunque escasas suelen ser muy intensas lo cual se traduce en un alto riesgo de inundaciones, estos cauces efímeros o ramblas recogen las aguas y las vierten a la laguna costera del Mar Menor.

La cuenca de la rambla del Albujón abarca una superficie de unos 543 km^2 y constituye la principal red de drenaje del Campo de Cartagena. Se caracteriza topográficamente por ser una extensa llanura con elevaciones moderadas, donde destacan algunos cerros y cabezos. Su elevación media es de 220 m, oscilando desde una máxima de 1065 m hasta el nivel del mar.

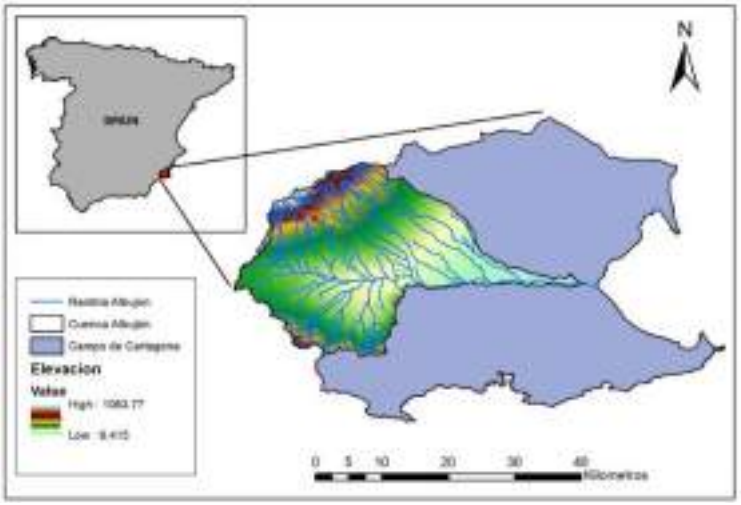


Figura 1. Mapa ubicación de la cuenca de la rambla del Albujón. Fuente: elaboración propia.

La zona de estudio esta caracterizada por un clima semiárido, donde la temperatura media oscila entorno a los 11°C en invierno y a los 25°C en verano. La precipitación media anual es de 300 mm, con la mayoría de las precipitaciones concentradas en tormentas de episodios cortos en otoño y primavera (García-Pintado, 2007). En estos períodos de torrencialidad se producen avenidas en la rambla, que generan los problemas de arrastres, erosión e inundaciones. La cuenca se caracteriza por su agricultura intensiva, la cual determina la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de tormenta. Los principales usos del suelo son cultivos de labor en secano (43 %), cultivos de regadío (33 %) y bosque de coníferas y matorrales (20 %).

2.2. Descripción del modelo SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998) es un modelo semidistribuido desarrollado por el Servicio Agrícola de Investigación (ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). SWAT está diseñado para predecir el impacto de diversas prácticas de gestión de tierras sobre la hidrología, los sedimentos y el transporte de contaminantes agrícolas a escala de cuenca, con distintos tipos, usos y gestión de suelos. Para el desarrollo de este estudio se ha escogido este modelo por su amplia aplicación con éxito en cuencas de todo el mundo bajo diversas condiciones espaciales y medioambientales (Gassman et al., 2007).

SWAT es un modelo de simulación continua que opera a escala diaria. Sus principales componentes son la hidrología, el clima, el ciclo de nutrientes, el transporte de sedimentos, el desarrollo de los cultivos, la gestión agrícola y la dinámica de pesticidas.

La heterogeneidad espacial de una cuenca se preserva mediante la topografía, dividiendo la cuenca en múltiples subcuencas. Estas subcuencas son posteriormente subdivididas en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en función de las características del suelo, los usos del suelo y el mapa de pendientes. En cada HRU, la simulación de los procesos hidrológicos de la cuenca es separada en una fase terrestre, la cual controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas incorporados al canal principal de cada subcuenca. Y una fase de tránsito de aguas por los cauces, la cual es definida como el movimiento del agua, sedimentos y demás componentes a través de la red de cauces de la cuenca hidrográfica hacia el punto de salida (Neitsch et al., 2011).

2.3. Datos de entrada del modelo SWAT

El modelo SWAT requiere una amplia selección de datos de entrada para su aplicación (Neitsch et al., 2011), en la Tabla 1 se muestra una visión detallada de la información recopilada para llevar a cabo la modelización hidrológica de la rambla del Albujón.

Datos	Descripción	Fuente
Modelo Digital del Terreno	Resolución espacial 25x25m (MDT25)	Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Mapa de Usos del Suelo	Mapa de Cultivos y Aprovechamiento 2000-2010 a escala 1:50.000	Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA)
Mapa de Tipos de Suelo	Resolución espacial 1x1km	Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo (HWSD)
Datos Climáticos	Estaciones meteorológicas MU31, MU62, CA21, CA42, CA52, CA91 y TP42.	Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA).

Tabla 1. Datos de entrada del modelo SWAT. Fuente: Elaboración Propia.

Debido al alto grado de antropización de la cuenca, se han incluido en el modelo las prácticas agrícolas y el programa de riegos llevado a cabo en la zona de estudio.

2.4. Datos de evapotranspiración satelital de GLEAM

Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM, http://www.gleam.eu) consiste en un paquete de datos que contiene un conjunto de algoritmos que estiman por separado los 5 diferentes componentes de la evaporación a escala global (transpiración, pérdida por interceptación, sublimación de la nieve, evaporación de suelo sin vegetación y evaporación en aguas abiertas), así como la evapotranspiración potencial, la humedad del suelo en la zona radicular y la humedad superficial del suelo, basándose en observaciones satelitales diarias de los generadores meteorológicos de la evaporación terrestre, las características de la vegetación y la humedad del suelo (Miralles et al., 2011; Martens et al., 2017).

En este estudio, para la calibración y validación del modelo, se ha empleado la versión GLEAM v3.2b creada a partir de medidas satelitales.

2.5. Calibración y validación del modelo SWAT

En cuencas de clima semiárido, como es el caso de estudio, el efecto de la vegetación sobre el ciclo hidrológico es tal que hasta un 90 % de la precipitación vuelve a la atmosfera mediante la evaporación o evapotranspiración (Pilgrim et al., 1998). Además, en los últimos años han surgido una serie de productos de teledetección (GLEAM, MODIS, SEBBop…) que permiten la calibración de los modelos hidrológicos mediante datos satelitales.

Parámetro	Descripción	Unidades
ALPHA_BF.gw	Coeficiente de agotamiento del flujo base (días)	Días
CANMX.hru	Almacenamiento máximo de agua en la cobertura vegetal	mm
CN2.mgt	SCS Numero de curva	-
EPCO.hru	Factor de compensación de la captación de las plantas	-
ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	-
GWQMN.gw	Profundidad del acuífero superficial a partir de la cual se produce flujo de retorno	mm
GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo del flujo subterráneo	días
GW_REVAP.gw	Coeficiente evaporación del flujo subterráneo	-
REVAPMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial para evaporación a la capa de suelo	mm
SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo	mm H_2O/ mm suelo
SOL_K().sol	Conductividad hidráulica saturada	mm/h

Tabla 2. Parámetros del modelo SWAT calibrados. Fuente: Elaboración Propia.

En este estudio se ha realizado la calibración del modelo SWAT mediante datos de evapotranspiración satelital obtenidos de GLEAM, lo cual permite reducir la incertidumbre del modelo desarrollado. Esta calibración se ha llevado acabo de forma automática mediante la herramienta SWAT-CUP (SWAT - Calibration Uncertainly Procedures) empleando como algoritmo el SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting v2) (Abbaspour et al., 2015). Para ello, un total de 11 parámetros (Tabla 2) fueron seleccionados.

Para estimar la incertidumbre de las series simuladas con respecto a la observada, es necesario seleccionar una función objetivo durante el proceso de calibración. Por tanto, en este estudio el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) fue seleccionado como función objetivo.

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{obs,i} - Y_{sim,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{obs,i} - \overline{Y_{obs}}\right)^2}$$

Donde NSE oscila entre -∞ y 1, siendo el valor optimo NSE=1.

Durante el proceso de calibración y validación, además del coeficiente NSE, se han empleado también como de medidas de bondad del ajuste el coeficiente de correlación (R) y el porcentaje del sesgo (PBIAS).

2.6. Prácticas de gestión agrícola (BMP)

A partir de las medidas urgentes de reducción de sedimentos y nutrientes propuestas por la Ley 1/2018, para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor (CARM, 2018), la BMP de plantación siguiendo las curvas de nivel fue seleccionada y simulada con el modelo SWAT. Esta práctica agrícola consiste en el arado y plantación de todos los cultivos de la cuenca siguiendo el contorno de la topografía de la misma o curvas de nivel, lo cual incrementa la capacidad de infiltración del suelo, produce una mayor interceptación de la escorrentía superficial y reduce la cantidad de sedimentos y nutrientes en las aguas. La efectividad de esta BMP ante la reducción de inundaciones ha sido cuantificada mediante la comparación del escenario de BMP con el escenario base, para obtener el porcentaje de reducción de los caudales máximos. Para ello se ha empleado la siguiente ecuación:

$$Efectividad\ (\%) = \frac{(Q_{Base} - Q_{BMP})}{Q_{Base}} \cdot 100$$

Donde Q_{Base} es la media anual de los caudales máximos para el escenario base y Q_{BMP} es la media anual de los caudales máximos del escenario simulado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Calibración y validación del modelo SWAT

Los periodos de calibración y validación han sido seleccionados a partir de la disponibilidad de los datos satelitales de GLEAM v3.2b (2003 - 2015). La calibracion del modelo SWAT mediante datos de evapotranspiración real se ha realizado para el periodo 2003 - 2008, seleccionándose primeramente un periodo de calentamiento del modelo de 3 años (2000 - 2002). La validación de modelo ha sido realizada para el periodo 2009 - 2015. Para la calibracion automática mediante SWATCUP, se han realizado un total de 1000 simulaciones divididas en dos lotes de 500 simulaciones cada una. Los resultados muestran un buen ajuste del modelo tanto en la calibración como en la validación.

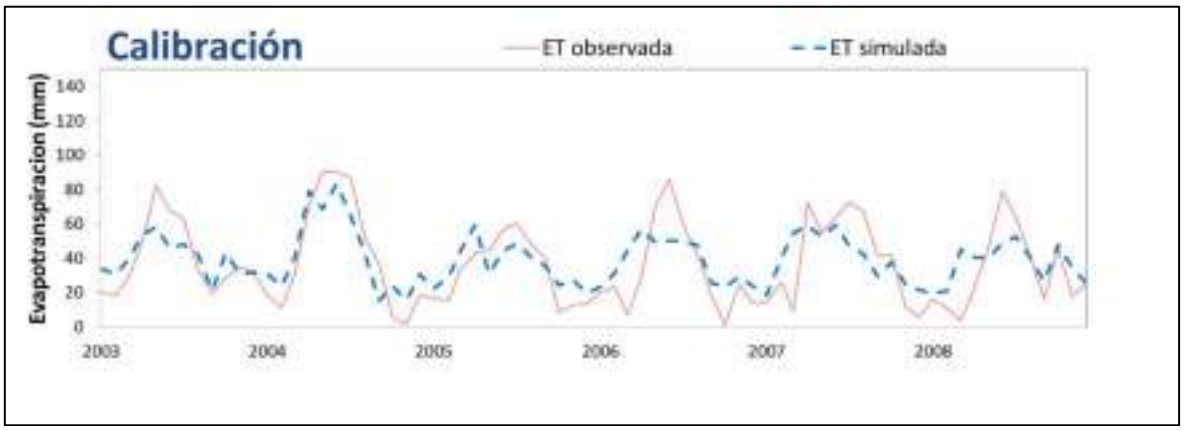


Figura 2. Gráfico de calibración del modelo SWAT. Fuente: elaboración propia.

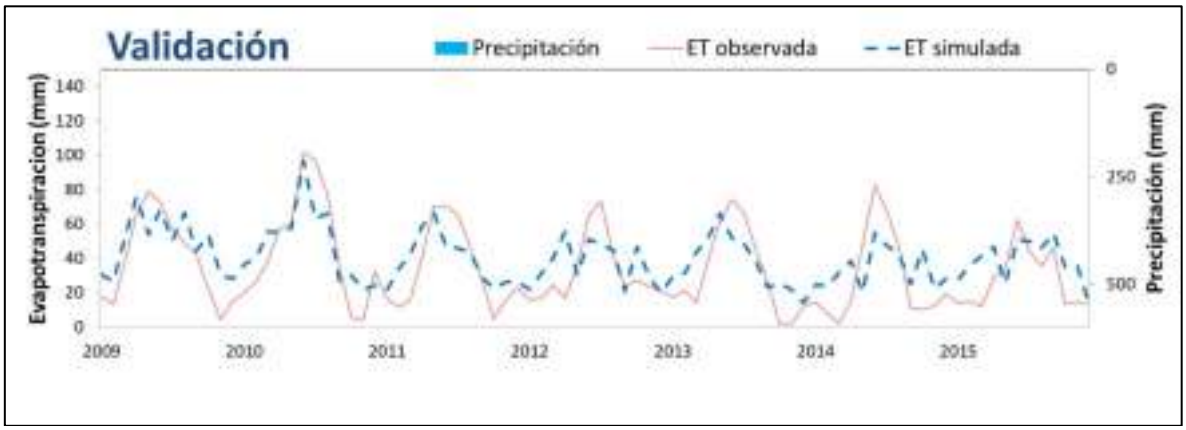


Figura 3. Gráfico de validación del modelo SWAT. Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso de calibración se logró alcanzar un valor de NSE de 0.56, un R de 0.77 y un PBIAS de -5.89 %, lo cual muestra un ajuste satisfactorio del modelo en el periodo de calibración. En cuanto al periodo de validación, también se logró un buen ajuste de los estadísticos con un valor de NSE de 0.51, un R de 0.76 y un PBIAS de -17.19 %. El buen ajuste conseguido supone una reducción considerable de la incertidumbre asociada al modelo hidrológico de la cuenca de la rambla del Albujón.

3.2. Efectividad de la plantación siguiendo las curvas de nivel sobre la reducción de las inundaciones

Los resultados indican que el caudal máximo diario para el periodo de estudio simulado (2001 - 2019) puede reducirse de media en torno a un 49 % mediante la aplicación de la BMP de plantación de los cultivos siguiendo las curvas de nivel.

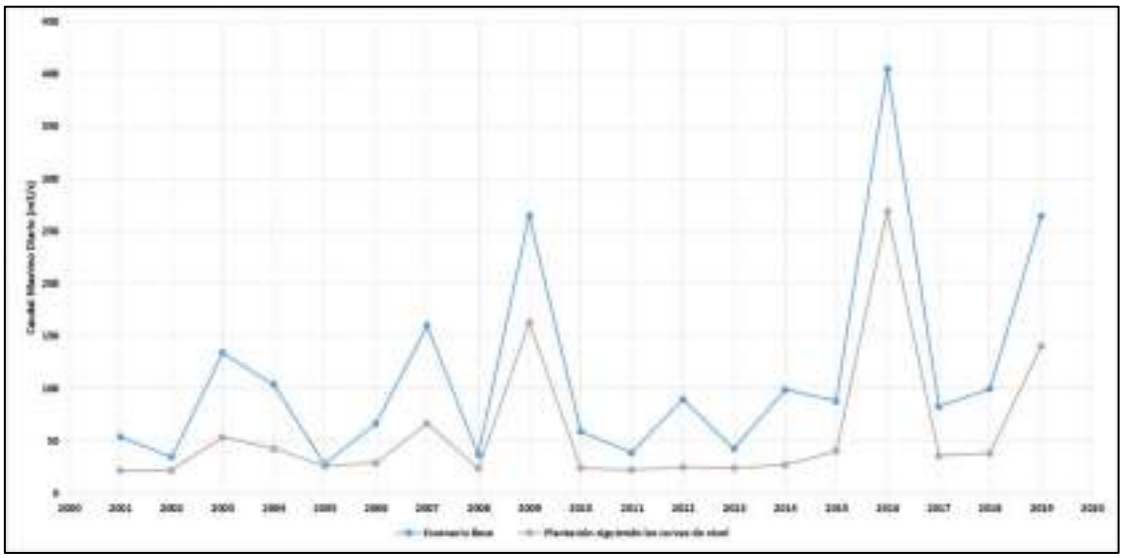


Figura 4. Gráfico de caudales máximos diarios de cada año simulados por SWAT. Fuente: elaboración propia.

En los eventos más extremos, tales como los ocurridos en los años 2009, 2016 y 2019, esta reducción de caudales máximos se sitúa en torno al 40 %, lo cual supondría una reducción importante de los daños causados por las inundaciones.

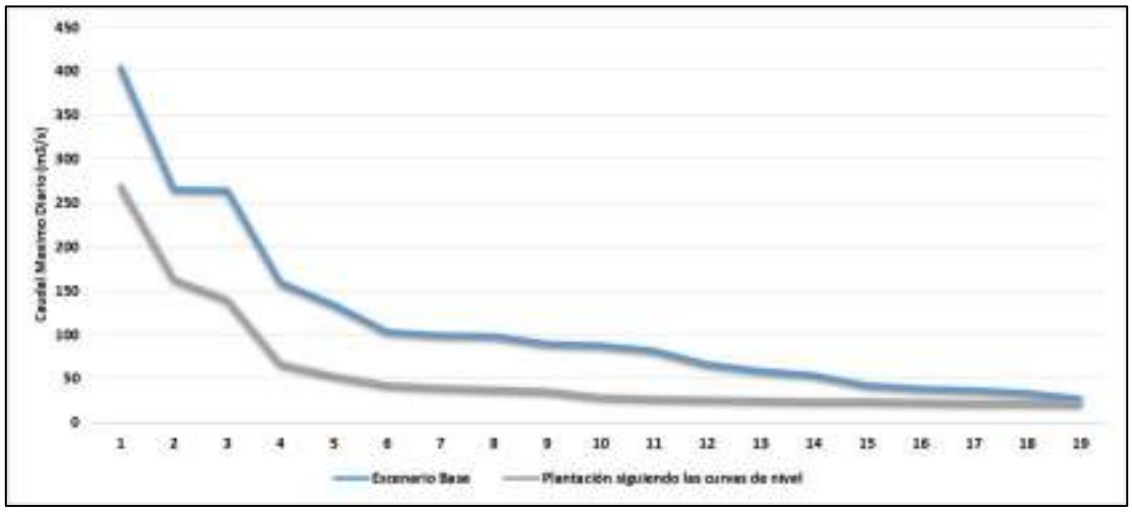


Figura 5. Curva anual de caudales máximos diarios para el periodo de estudio (2001 - 2019). Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El grave deterioro ecológico del Mar Menor, debido al aumento de la presencia de nutrientes y sedimentos en sus aguas, ha concluido en el desarrollo de la Ley 1/2018, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Esta ley conlleva la aplicación de numerosas BMP, con el objetivo de reducir la carga de nutrientes y sedimentos en las aguas del Mar Menor. Entre dichas BMP se encuentra la plantación de cultivos siguiendo las curvas de nivel. El objetivo de este estudio ha sido evaluar los efectos de dicha BMP sobre el riesgo de inundaciones.

Los resultados muestran que la plantación de cultivos siguiendo las curvas de nivel produce una

importante reducción de los caudales máximos diarios, lo cual se traduce en una reducción significativa del riesgo de inundaciones. Este descubrimiento supone un valor añadido al motivo común de la aplicación de las BMP, reducción de sedimentos y nutrientes. Por tanto, cabe destacar que los beneficios de la aplicación de las BMP se extienden más allá de la mejora de la calidad de las aguas y deben ser tenidos en cuenta a la hora de planificar su desarrollo.

REFERENCIAS

- Abbaspour, K. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual*. Department of Systems Analysis, Intergrated Assessment and Modelling (SIAM), EAWAG., User Man., Swiss Federal Institute 5 of Aqualtic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
- Antolini, F., Tate, E., Dalzell, B., Young, N., Johnson, K. and Hawthorne, P. L. (2019). Flood Risk Reduction from Agricultural Best Management Practices. *Journal of the American Water Resources Association,* 1-19.
- Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R. and Williams, J. (1998). Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Bosch, N. S., Allan, J. D., Selegean, J. P. and Scavia, D. (2013) Scenario-testing of agricultural best management practices in Lake Erie watersheds. *Journal Great Lakes Resources*, 39, 429-436.
- Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. (2018). *Ley 1/2018, de 7 de febrero, de Medidas Urgentes para Garantizar la Sostenibilidad Ambiental en el Entorno del Mar Menor*. Boletín Oficial de la Región de Murcia, Murcia, España.
- García-Pintado, J., Martínez-Mena, M., Barberá, G. G., Albaladejo, J., and Castillo, V. M. (2007). Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *Science of the Total Environment*, 373(1), 220-239.
- Gassman, P., Reyes, M., Green, C. and Arnold, J. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future directions. *Transactions of the ASABE*, 50, 1211-1250.
- Martens, B., Miralles, D., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R., Fernández-Prieto, D., Beck,
- H., Dorigo, W. and Verhoest, N. (2017). GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 10(5), 1903-1925.
- Miralles, D., Holmes, T., De Jeu, R., Gash, J., Meesters, A. and Dolman, A. (2011). Global land surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 453-469.
- Nash, I. and Sutcliffe, I. (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. and Williams, J. (2011). *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Water Resources Institute, Texas.
- León, V., Moreno-González, R., García, V. and Campillo, J. (2017). Impacts of flash flood events on the distribution of organic pollutants in surface sediments from a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, SE Spain). *Environmental Science & Pollution Research*, 24(5), 4284-4300.
- Pilgrim, D. H., Chapman, T. G., and Doran, D. G. (1988). Problems of rainfall semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33(4), 379-400.
- Velasco, J., Lloret, J., Millán, A., Marín, A., Barahona, J., Abellán, P. and Sánchez-Fernández, D. (2006). Nutrient and particulate inputs into the Mar Menor Lagoon (SE Spain) from an intensive agricultural watershed. *Water, Air and Soil Pollution*, 176, 37-56.

METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN DE REDES DE DRENAJE MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL HIDRÁULICO

Leonardo Bayas-Jiménez
leobaji@posgrado.upv.es
https://orcid.org/0000-0001-8957-7604

F. Javier Martínez-Solano
jmsolano@upv.es
https://orcid.org/ 0000-0002-8140-5960

Pedro L. Iglesias-Rey
piglesia@upv.es
https://orcid.org/ 0000-0001-8300-3255

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, España

RESUMEN

Un problema que preocupa a los gestores de los sistemas de drenaje es el incremento de eventos de lluvias extremas que cada vez se manifiestan con mayor frecuencia en diferentes lugares del mundo. Su ocurrencia produce sobrecarga hidráulica en el sistema de drenaje y en consecuencia inundaciones. Adaptar la infraestructura existente para que pueda soportar lluvias extremas sin generar consecuencias para sus habitantes se ha convertido en una necesidad para las ciudades. Este documento muestra una nueva forma de rehabilitar los sistemas de drenaje, utilizando para este objetivo una novedosa metodología que considera la inclusión de elementos de control hidráulico en la red, la instalación de tanques de tormenta en línea y la sustitución de tuberías. El análisis hidráulico de la red se realiza mediante el modelo Storm Water Management Model (SWMM) y para el proceso de optimización se usa con un algoritmo genético llamado Algoritmo Pseudo Genético. La inclusión de controles hidráulicos en la rehabilitación de redes de drenaje puede ser una alternativa para mejorar los niveles de inundación y a minimizar el tamaño de las estructuras de protección necesarias.

1. INTRODUCCIÓN

La acción antropológica ha alterado la composición de la atmosfera mundial, una de las más evidentes es el desarrollo del espacio urbano. Durante las últimas décadas las ciudades han experimentado un proceso constante de crecimiento, que ha reducido las áreas verdes que las rodeaban, cambiándolas por superficies altamente impermeables. Estos factores han derivado en que muchas ciudades aprecien el incremento de lluvias extremas e inundaciones. La intervención efectiva en estas redes es importante para que sean capaces de dar seguridad a las ciudades y evitar pérdidas económicas y de vidas.

El uso de tanques de tormenta en un entorno urbano para disminuir el riesgo de inundaciones ha sido estudiado y comprobado como uno de los más eficientes métodos para reducir la escorrentía superficial (Andrés-Doménech et al., 2012; ver también Cunha et al., 2016; Kessler & Diskin, 1991;

Todeschini et al., 2012; Woods et al., 2007; Wang, Sun, & Sweetapple, 2017).

Para solucionar problemas de optimización en redes de drenaje, los enfoques heurísticos han demostrado ser una herramienta útil y poderosa. Muchas investigaciones se han realizado con la ayuda de este procedimiento. Se puede citar el trabajo de Iglesias-Rey et al., (2017) quienes proponen una metodología para rehabilitación de redes de drenaje optimizando el coste de instalación de tanques de tormenta, coste del cambio de tuberías y los costes asociados a la inundación. Utilizando un algoritmo genético. Dentro de la metodología propuesta, se han definido dos formas diferentes de representar el coste de los daños de inundación: ya sea proporcional al volumen de inundación en cada nodo, o proporcional al nivel de inundación. Más adelante, Ngamalieu-Nengoue, Martínez-Solano, et al. (2019) presentan una metodología de optimización de redes de drenaje utilizando un algoritmo genético multiobjetivo. Este trabajo recalca la importancia de mejorar el esfuerzo computacional en el proceso de optimización.

Investigaciones recientes muestran la importancia de almacenar temporalmente el agua en la red de drenaje como una alternativa para disminuir las inundaciones. Cabe citar el trabajo de Dziopak (2018) quien propone como una alternativa a la instalación de depósitos más económica, utilizar la red de alcantarillado como una unidad de almacenamiento aprovechando todos sus componentes para almacenar temporalmente el agua, para esto diseña un canal de retención con particiones interiores en forma de cámaras con una apertura en el fondo del canal, transformando la red en un canal de retención. Por otro lado, Leitão et al. (2018) presentaron un modelo que utiliza un algoritmo para la ubicación de limitadores de flujo en la red de drenaje, con el objetivo de maximizar el almacenamiento dentro de la red, el modelo también considera el impacto potencial de fallo del dispositivo de control de flujo. Concluyen que la capacidad de almacenamiento en las redes puede ser considerable. Mencionan que, si los dispositivos locales de control de flujo son Instalado correctamente, el volumen de agua puede movilizarse y convertirse en una solución interesante para mitigar las inundaciones.

Más adelante, Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, Mora-Meliá, et al. (2019) en su investigación concluyen que la acción combinada de instalar tanques de tormenta y la renovación de tuberías es mucho más efectiva que la intervención por separado de estas dos técnicas. En los resultados de su estudio en el que usan un algoritmo pseudo genético; obtienen en ciertas tuberías un diámetro optimizado menor al original; Por lo que señalan la necesidad de incluir una compuerta u orificio como control hidráulico para introducir una pérdida de carga en el sistema. Estos resultados determinan que los controles hidráulicos se presentan como una técnica para mejorar la eficiencia del sistema al permitir la acumulación de agua en ciertos puntos de la red, lo que disminuye el tiempo de concentración aguas abajo y, por lo tanto, las inundaciones.

Para dar continuidad a esta línea de investigación, la metodología propuesta en este trabajo incluye el uso del control hidráulico en la optimización de redes de drenaje. El objetivo de este estudio es reducir el coste de la rehabilitación y dotar de mayor seguridad a las ciudades en escenarios de lluvias extremas. Con este objetivo la metodología analiza la red utilizando el modelo Storm Water Management Model (Rossman, 2009) conectado mediante una librería de funciones denominada SWMM Toolkit (Martínez-Solano et al., 2016) a un Algoritmo Pseudo Genético (Mora-Melia et al., 2013) para encontrar las mejores soluciones al problema de optimización. Las soluciones encontradas se analizan términos de costes mediante la evaluación de una función objetivo previamente definida. Como caso de estudio, esta metodología se aplica en un sector de la red de drenaje de la ciudad de Bogotá.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo tiene como finalidad presentar una metodología para la rehabilitación de redes de drenaje, que contemple el uso de controles hidráulicos como un elemento que ayude a reducir el nivel de las inundaciones. El control hidráulico instalado en ciertos putos de la red genera una pérdida de carga que ralentiza el flujo de agua evitando su acumulación aguas abajo y la sobrecarga del sistema que puede provocar una inundación. Esta metodología considera también la instalación de tanques de tormenta en línea y la renovación de tuberías, debido a que su uso combinado ha sido demostrado como una alternativa efectiva para el control de inundaciones.

La metodología consiste en realizar el análisis hidráulico de la red mediante el modelo SWMM y con la ayuda de un Algoritmo Genético evaluar las soluciones obtenidas para encontrar la mejor solución que permita robustecer el sistema frente a eventos de lluvia extrema.

Planteado así el problema se contemplan las siguientes asunciones iniciales:

1. La tormenta de diseño contempla el escenario más desfavorable, se considera estática y para toda la red.
2. El modelo de escorrentía para el análisis de la red debe ser previamente definido.
3. El modelo de simulación matemática SWMM se utiliza como instrumento de análisis de la red. Se utiliza el análisis de onda dinámica que considera las ecuaciones completas de Saint-Venant. Este análisis es considerado debido a que es el que mejor representa al flujo presurizado que puede ocurrir cuando la capacidad de transporte en la red es insuficiente
4. El modelo matemático de la red debe ser calibrado y simplificado. Sin que esto signifique una pérdida de veracidad en los resultados.
5. Las acciones que se tomaran son la renovación de tuberías con otras de mayor diámetro, la instalación de tanques de tormenta y la instalación de controles hidráulicos.
6. Los ST se consideran instalados en línea y la profundidad es la misma que la del pozo de revisión existente.
7. El problema de optimización se analiza en términos de costes.(Iglesias-Rey et al., 2017) La función de coste debe ser establecida en función de las variables hidráulicas y contempla el coste de renovación de tuberías, el coste de instalación de ST y el coste de daños provocados por las inundaciones.

2.1. Variables de decisión

El problema de optimización de una red de drenaje considera tres tipos de variables de decisión. Se tiene, por un lado, el diámetro de las tuberías, el modelo de optimización busca la mejor combinación de diámetros de la red para minimizar las inundaciones. Esta variable de decisión puede variar desde un valor 0 que muestra que no es necesario reemplaza la tubería hasta un valor máximo establecido. El valor 0 implica que la capacidad de la tubería es suficiente para transportar el caudal analizado mientras que un valor diferente nos indica la necesidad de aumentar la capacidad de la tubería.

Otro tipo de variables de decisión es la capacidad de almacenamiento de los nodos. El modelo de optimización busca la mejor ubicación de los ST en la red y el menor volumen de estos para reducir las inundaciones. Al plantearse el problema en un entorno urbano se limita la excavación a la profundidad actual de los pozos de visita, definiendo como variable de decisión la sección transversal del tanque de tormenta. Los valores que puede tomar esta variable de decisión van de 0 que significa que no se requiere ST en el nodo hasta un valor máximo previamente definido en función del espacio disponible. Se debe tomar en cuenta que esta variable de decisión para ser utilizada por el modelo de optimización debe ser discretizada. Sobre este tema se puede consultar de forma más detallada en (Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, Mora-Meliá, et al., 2019). El último grupo de variables de decisión es el que corresponde al coeficiente de pérdida local introducidos en ciertas

tuberías de la red. Una pérdida de carga local es causada por un cambio rápido en magnitud o dirección de la velocidad, que pueden aparecer en curvas, contracciones o ampliaciones en la geometría de la tubería. En este trabajo, la perdida de carga es producida por una válvula de compuerta con diferentes grados de apertura que actúa como elemento de control hidráulico. Esta variable de decisión puede tomar valores desde 0 que nos indica que no se requiere control hidráulico hasta un valor máximo de cierre de la compuerta previamente definido.

2.2. Funciones de Coste

Es necesario definir funciones de coste para cada grupo de elementos que van a intervenir en el proceso de optimización de una red de drenaje que se pretende rehabilitar.

En este trabajo se presentan las funciones de coste definidas por Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, Mora-Meliá, et al. (2019) y se ha elaborado una función de coste de instalación de elementos de control hidráulico en la red. Estas funciones se detallan a continuación:

1. Coste de rehabilitación de aquellas tuberías que deban ser reemplazadas por falta de capacidad. Esta función se establece a partir de datos reales de costes proporcionados fabricantes de tuberías. Se ha ajustado la función que relaciona el coste unitario de las conducciones con su diámetro.

$$C_D(D_i) = \propto D_i + \beta D_i{}^2 \quad (1)$$

En la Ecuación 1, D_i es el diámetro de la tubería, y los coeficientes α y β son coeficientes de ajuste específicos para cada proyecto.

2. Coste de instalación tanques de tormenta que se requerirían para almacenar temporalmente el agua que no la red no sea capaz de desalojar en un evento de lluvia extrema.

$$C_V(V_i) = C_{min} + C_{var}\, V_i{}^w \quad (2)$$

El primer término de la Ecuación 2 representa un coste mínimo establecido para el ST mientras que el segundo término es variable en función del volumen de almacenamiento (V_i) requerido afectado por una constante C_{var} y un exponente w.

3. El coste de la instalación de elementos de control hidráulico a la salida de ciertos tanques de tormenta se establece a partir de datos de costes reales de válvulas de compuerta.

$$C_v(D_i) = \gamma D_i - \mu D_i{}^2 \quad (3)$$

En la Ecuación 3, D_i es el diámetro de la tubería, γ y μ son coeficientes de ajuste específicos para cada proyecto.

5. Coste de los daños provocados por las inundaciones, esta función depende del nivel alcanzado por el agua (y_i). La Ecuación 4 se determina mediante una curva de vulnerabilidad que establece el porcentaje de daños en función del nivel de agua alcanzado. Los autores cruzaron esta curva con los costes de la inundación por metro cuadrado para diferentes usos de suelo. En la ecuación partir de un cierto nivel (y_{max}) el daño se considera irreparable y, por tanto, la función deja de crecer y el coste alcanzará su máximo valor (C_{max})
6.

$$C_y(y_i) = C_{max}\left(1 - e^{-\lambda \frac{y_i}{y_{max}}}\right)^r \quad (4)$$

2.3. Función Objetivo

El problema de optimización se enfoca en minimizar los problemas asociados a las inundaciones con el mínimo coste de inversión. Por lo tanto, esta función objetivo estará compuesta las cuatro funciones de coste que contempla esta metodología. La función objetivo es evaluada para cada solución

encontrada por el modelo de optimización para seleccionar la que menores coste requiera para robustecer la red en eventos de lluvias extremas. En la función objetivo, cada una de las funciones de coste va precedido de un multiplicador de Lagrange (τ_1, τ_2, τ_3 y τ_4). Estos multiplicadores permiten decidir qué sumandos de la función objetivo se considerarán en cada proyecto de rehabilitación. Además, permite asignar importancias relativas a cada término de acuerdo con las características propias del proyecto de rehabilitación analizado.

$$F = \tau_1 \sum_{i=1}^{n=m_s} C_D(D_i) + \tau_2 \sum_{i=1}^{n=n_s} C_V(V_i) + \tau_3 \sum_{i=1}^{n=p_s} C_v\,(D_i) + \tau_4 \sum_{i=1}^{n=N_N} C_y(y_i) \qquad (5)$$

En la Ecuación 5, m_s representa el número de conductos que deben ser reemplazados, n_s el número de nodos donde se requiere instalar un tanque de tormenta, p_s el número de conductos donde se requiere instalar un elemento de control hidráulico y N_N los nodos de la red.

3. CASO DE ESTUDIO

La metodología se aplicó a un sector de la red de drenaje de la ciudad de Bogotá, Colombia (Figura 1). Esta red llamada E-Chico se compone de 35 subcuencas hidrológicas que ocupan una superficie de 51 hectáreas, 35 conductos y 35 nodos de conexión. Los conductos son de sección circular con diámetros que varían desde 300 mm a 1400 mm. Y cubren una longitud de 5000 metros aproximadamente. La red funciona completamente a gravedad con un desnivel entre el punto más alto y el punto más alto de 39 metros.

Para el análisis se utilizó una tormenta de diseño basada en una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (Figura 2) definida previamente por Ngamalieu-Nengoue et al. (2019) calculada mediante el método de bloques alternos con intervalos de 5 minutos. La tormenta de diseño se diseñó bajo un escenario de cambio climático (Gulizia & Camilloni, 2015).

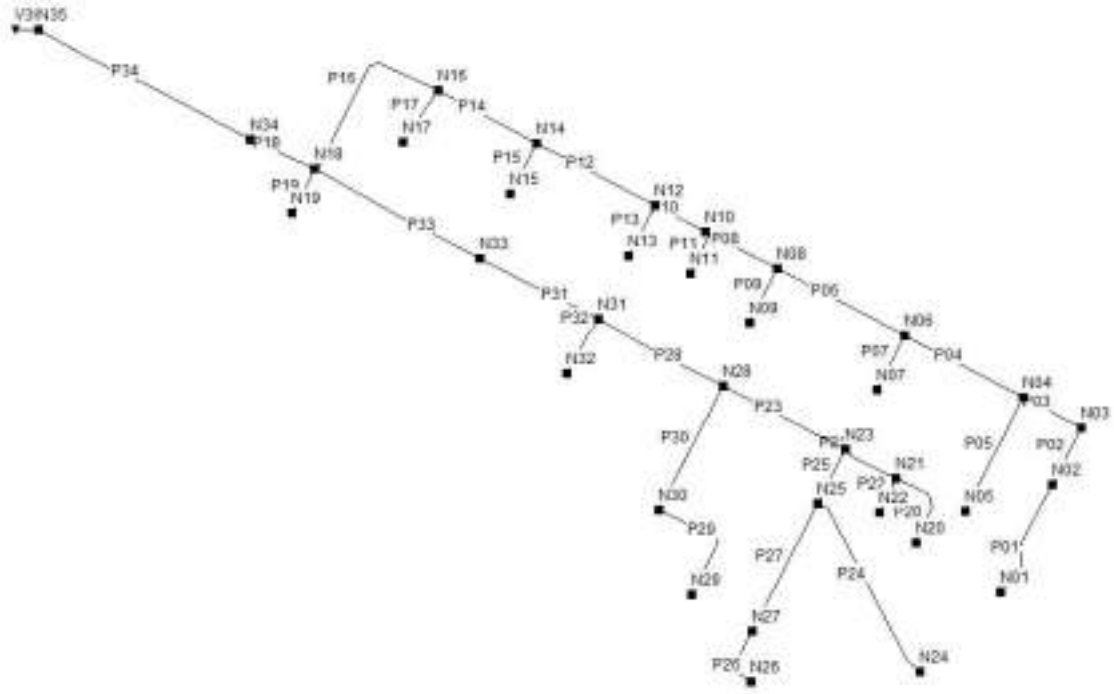


Figura 1. Red de drenaje E-chico, Bogotá. Fuente: elaboración propia.

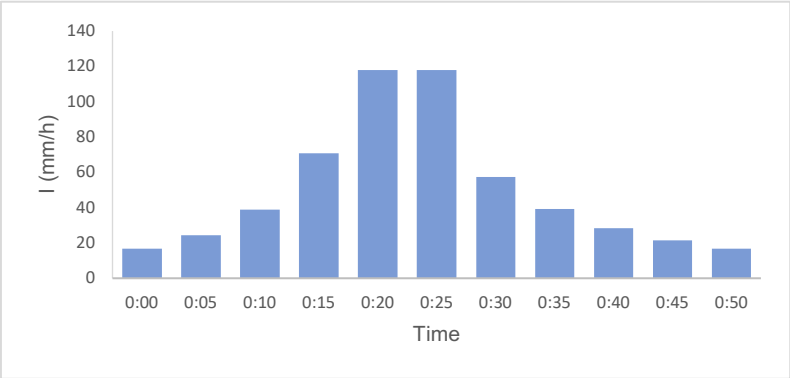


Figura 2. Lluvia de diseño. Fuente: elaboración propia.

La función de coste de reemplazo de tuberías se ha obtenido en base a los precios reales de tuberías en Colombia los coeficientes α y β de la ecuación se establece con los siguientes valores α = 40,69 y β = 208,06.

Por lo tanto, la función queda definida por la Ecuación 6.

$$C_D(D_i) = 40{,}69\ D_i + 208{,}06\ {D_i}^2 \quad (6)$$

La función de coste de instalación de los tanques de tormenta se determina en función del coste de materiales y el coste de construcción en el lugar del caso de estudio. De acuerdo con esto la función

se define mediante la Ecuación 7.

$$C_V(V_i) = 16.923 + 318{,}4\ {V_i}^{0{,}65} \quad (7)$$

Para este trabajo se ha desarrollado una función de coste para la instalación de elementos de control hidráulico en base al coste real de válvulas de compuerta de diferentes diámetros en Colombia. Se establecen los siguientes valores γ= 4,1737 y μ = -0,00041.
La función queda definida por la Ecuación 8.

$$C_v(D_i) = 4{,}1737\ D_i - 0{,}000211\ {D_i}^2 \quad (8)$$

La función de coste de daños ha sido definida previamente por Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey y Martínez-Solano (2019) en esta función se considera como nivel máximo de inundación 1.40 m. Los autores establecen los siguientes valores λ= 4.89 r = 2.
Con esto la función queda definida por la Ecuación 9.

$$C_y(y_i) = 1.268\left(1 - e^{-4{,}89\frac{y_i}{1{,}4}}\right)^2 \quad (9)$$

Como primer paso en el proceso de optimización, es necesario conocer el estado actual del drenaje red. El análisis hidráulico en el modelo SWMM entrega los resultados que se muestran en la Tabla 1. Estos los resultados muestran que la red no ofrece las garantías de operación para brindar seguridad a la ciudad; por lo tanto, debe ser rehabilitado.

Nodo	Volumen de inundación (m^3)	Área de Inundación (m^2)	Altura de inundación (m)	Coste (€)
N02	123.56	1240	0.1	135,857.00 €
N04	132.56	930	0.413	181,375.00 €
N06	501.79	1890	0.265	875,502.00 €
N07	23.95	1250	0.019	6,644.00 €
N09	1.82	1130	0.002	45.00 €
N10	385.12	700	0.55	646,838.00 €
N11	25.83	820	0.032	11,288.00 €
N23	949.54	450	2.11	569,922.00 €
N32	36.65	1500	0.024	12,727.00 €
N33	469.82	3030	0.155	671,908.00 €
N34	1181.87	3270	0.361	2,131,929.00 €
Total				5,244,035.00 €

Tabla 1. Estado actual y coste de los daños por inundación. Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

En trabajos de investigación previos (Ngamalieu-Nengoue et al., 2019) la optimización de la red de drenaje E-Chico fue realizada contemplando la posibilidad de instalación de tanques de tormenta y el reemplazo de tuberías. Los autores consideraron 5 diferentes escenarios para buscar la mejor solución. EL escenario 5 ofrece los mejores resultados considerando la instalación de 3 tanques de tormenta y la renovación de 3 tuberías. Para esta solución, la función objetivo toma un valor de 213,981 € (Tabla 2).

En este trabajo se han realizado series de 50 simulaciones realizadas con diferentes combinaciones de parámetros. La Figura 3 representa los resultados de la mejor solución encontrada. La solución requiere de la instalación de tanques de tormenta en los nodos N04, N10, N223. La renovación de la tubería P02 y la instalación de elementos de control hidráulico en las tuberías P04 y P10. El valor que toma la función objetivo en esta solución es de 203,859.69 € con un valor del coste instalación de tanques de tormenta de 181,540.69 € el coste de la renovación de tuberías de 6,583.81 € el coste de la instalación de controles hidráulicos de 7,671.75 € y el coste asociado a las inundaciones de 8,063.44 €. Para mostrar las ventajas de la metodología la Tabla 2 muestra los resultados obtenidos por Ngamalieu-Nengoue et al. (2019)

y los resultados de la metodología propuesta. Se puede apreciar que además de reducir el coste de inversión en todos los elementos necesarios para mejorar la red, la inclusión de control hidráulico reduce el coste de daños por inundación en la red por lo que se demuestra la conveniencia de incluir este tipo de elementos en los modelos de optimización de redes.

Metodología	Función Objetivo	Términos de la Función Objetivo			
		Coste de Inundación	Coste de Tanques de Tormenta	Coste de Tuberías	Coste de Control Hidráulico
Ngamalieu-Nengoue et al. (2019b)	213,981.00 €	12,701.00 €	186,353.00 €	14,927.00 €	-
Propuesta	203,859.69 €	8,063.44 €	181,540.69 €	6,583.81 €	7,671.75 €

Tabla 2. Resultados del proceso de optimización. Fuente: elaboración propia.

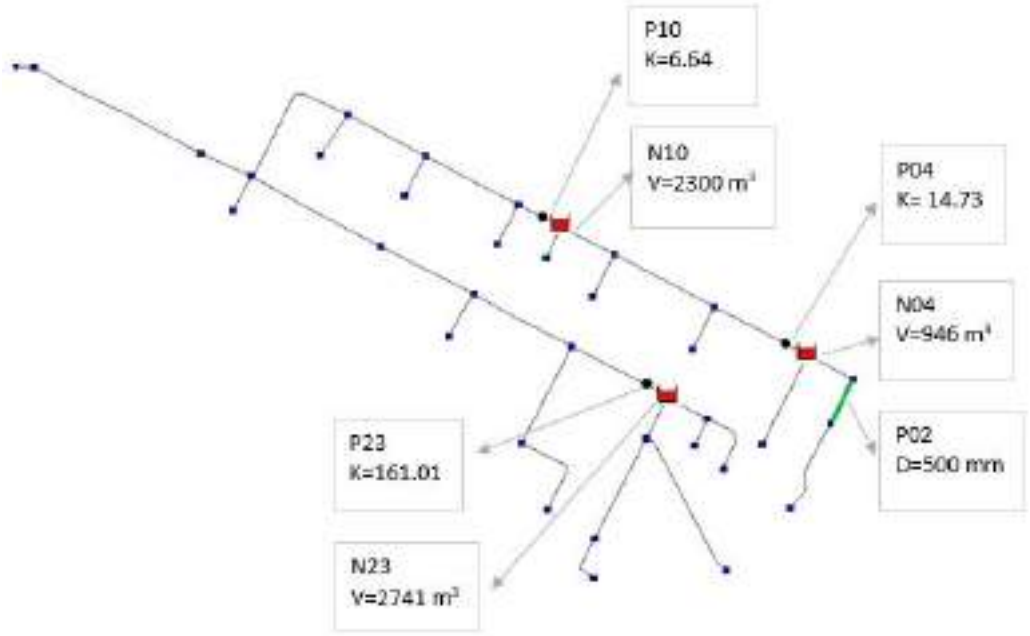


Figura 3. Representación de los tanques de reserva, cambio de tuberías y elementos de control hidráulico en la red E-Chico de acuerdo con el resultado de la metodología aplicada. Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

Después de presentar la metodología y aplicarla a un caso de estudio específico se pueden hacer las siguientes conclusiones: el uso combinado de sustitución de tuberías por otras de mayor diámetro y la instalación de tanques de tormenta y la inclusión de controles hidráulicos es un método apropiado para optimizar las redes de drenaje que requieren rehabilitación; además, el uso de algoritmos genéticos demuestra ser una herramienta válidos para este tipo de análisis.

Así, la principal conclusión de este trabajo es que el uso de HC disminuye significativamente el coste de intervención en la red de drenaje porque retiene el agua aguas arriba usando el volumen de la red para almacenar momentáneamente el agua, haciendo que el sistema sea más eficiente y evitando acumulación aguas abajo, evitando inundaciones.
En resumen, este estudio muestra que la inclusión de elementos de control hidráulico mejora la eficiencia de la rehabilitación modelo de redes de drenaje.

REFERENCIAS

- Andrés-Doménech, I., Montanari, A. & Marco, J. B. (2012). Efficiency of storm detention tanks for urban drainage systems under climate variability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *138*(1), 36–46. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000144
- Cunha, M. C., Zeferino, J. A., Simões, N. E. & Saldarriaga, J. G. (2016). Optimal location and sizing of storage units in a drainage system. *Environmental Modelling and Software*, *83*, 155–166. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.015
- Dziopak, J. (2018). A wastewater retention canal as a sewage network and accumulation reservoir. In: D. Słyś & J. Dziopk (Eds.), *E3S Web of Conferences*, vol. 45, p. 16. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500016
- Gulizia, C. & Camilloni, I. (2015). Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. *International Journal of Climatology*, *35*(4), 583–595. https://doi.org/10.1002/joc.4005
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Saldarriaga, J. G. & Navarro-Planas, V. R. (2017). Pseudo-genetic Model Optimization for Rehabilitation of Urban Storm-water Drainage Networks. *Procedia Engineering*, 186, 617–625. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.278
- Kessler, A. & Diskin, M. H. (1991). The efficiency function of detention reservoirs in urban drainage systems. *Water Resources Research*, *27*(3), 253–258. https://doi.org/10.1029/90WR02143
- Leitão, J. P., Carbajal, J. P., Rieckermann, J., Simões, N. E., Sá Marques, A. & de Sousa, L. M. (2018). Identifying the best locations to install flow control devices in sewer networks to enable in-sewer storage. *Journal of Hydrology*, *556*(3), 371–383. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.020
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Saldarriaga, J. G., & Vallejo, D. (2016). Creation of an SWMM toolkit for its application in urban drainage networks optimization. *Water (Switzerland)*, *8*(6). https://doi.org/10.3390/w8060259
- Mora-Melia, D., Iglesias-Rey, P. L., Martinez-Solano, F. J. & Fuertes-Miquel, V. S. (2013). Design of Water Distribution Networks using a Pseudo-Genetic Algorithm and Sensitivity of Genetic Operators. *Water Resources Management*, *27*(12), 4149–4162. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0400-6
- Ngamalieu-Nengoue, U. A., Iglesias-Rey, P. L. & Martínez-Solano, F. J. (2019). Urban Drainage Networks Rehabilitation Using Multi-Objective Model and Search Space Reduction Methodology. *Infrastructures*, *4*(2), 35. https://doi.org/10.3390/infrastructures4020035
- Ngamalieu-Nengoue, U. A., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Meliá, D. & Valderrama, J. G. S. (2019). Urban drainage network rehabilitation considering storm tank installation and pipe substitution. *Water (Switzerland)*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/w11030515
- Ngamalieu-Nengoue, U. A., Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L. & Mora-Meliá, D. (2019). Multi-objective optimization for urban drainage or sewer networks rehabilitation through pipes substitution and storage tanks installation. *Water (Switzerland)*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/w11050935
- Rossman, L. A. (2009). Storm water management model (SWMM) user's manual version 5.0. *Cincinnati, OH*, *45268*.
- Todeschini, S., Papiri, S. & Ciaponi, C. (2012). Performance of stormwater detention tanks for urban drainage systems in northern Italy. *Journal of Environmental Management*, *101*, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.003
- Wang, M., Sun, Y. & Sweetapple, C. (2017). Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach. *Journal of Environmental Management*, *204*, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.024
- Woods, B. B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. & Shaffer, P. (2007). The SUDS manual (C697). *CIRIA, London*, 600.

SOSTENIBILIDAD COMO MEDIDA DE MITIGACIÓN DE INUNDACIONES: UNA BREVE REFLEXIÓN

Francine Cansi
fcfc1@alu.ua.es
https://orcid.org/0000-0002-1434-4862

Paulo Márcio Cruz
pcruz@univali.br
https://orcid.org/0000-0002-3361-2041

Liton Lannes Pilau Sobrinho
liton@univali.br
https://orcid.org/0000-0001-5696-4747

Universidade do Vale do Itajaí, UNIVALI, Brasil

RESUMEN

Las inundaciones son un desastre natural, que también puede ser causado por la explotación del medio ambiente. El presente estudio tiene como objetivo comprender los efectos de este proceso a largo plazo, ya que las inundaciones pueden afectar directamente a la salud y al bienestar, tanto de la vida salvaje, como la humana. En cuanto al método de aproximación a la investigación, se caracteriza por ser inductivo, aplicando como técnica de investigación la revisión bibliográfica, con el objetivo de consolidar los principales documentos legales y medios electrónicos de diversas bases de datos que deberían guiar y subsidiar el tema propuesto. Las causas y consecuencias de las inundaciones afectan no solo a las personas, sino también al medio ambiente, no obstante, éstas pueden reducirse mediante una gestión y una legislación preventiva, capaces de mitigar la pérdida de vidas y garantizar que cada miembro de la comunidad esté protegido cuando ocurra una emergencia.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son actualmente eventos climáticos destacados y reflejan en la sociedad las pérdidas de biodiversidad nativa y los riesgos para los ecosistemas y los seres humanos, así como el impacto directo de la sobrecarga en las cuencas de los ríos. A medida que aumenta la temperatura global, también lo hace la frecuencia de aparición de eventos de inundación.

Este aumento hace fluir la contaminación de los sedimentos y la escorrentía de los cultivos agrícolas y sobrecarga el daño a los sistemas de suministro de agua, generando problemas ante suministro insuficiente de agua potable y su contaminación a gran escala, tanto de las aguas superficiales, como de las subterráneas y los sistemas de distribución (Papaioannou, Vasiliades & Loukas, 2014).
Este problema se ve exacerbado por la destrucción masiva de humedales y el desarrollo excesivo de las llanuras de inundación que se han producido durante el siglo pasado. Los humedales y las llanuras de inundación son el amortiguador natural del paisaje para lidiar con períodos de marea alta (Angeoletto & Santos, 2016).

Según Ni, Sun, Tianhong, Huang & Borthwick (2010), estos desastres se ven agravados por las

actividades humanas y la mala gobernanza manifestada en forma de degradación ambiental, implementación inadecuada de planes de mitigación de inundaciones en áreas propensas, negligencia en áreas rurales, sistemas de seguridad social débiles y formulación e implementación de políticas insuficientes.

En Brasil, como en muchos otros países, con la justificación de los "desastres naturales" existe una omisión real de la locura del ser humano por la explotación desenfrenada de la naturaleza, ya sea por deforestación o por el uso irracional de la tierra. Las consecuencias perjudiciales de la acción humana se ven reforzadas por la degradación de las áreas frágiles (Ferreira, 2017), por el urbanismo y la industrialización sin precedentes, lo que sin duda resulta en una deforestación masiva a gran escala (Abolade, Muili & Ikotun, 2013).

La razón principal es la falta de planificación y el proceso masivo de exploración ambiental y, en los centros urbanos, la impermeabilización de los suelos, lo que permite que el agua de lluvia fluya con rapidez, sin ser absorbida (Castro, 2003). En otros casos, también puede ser debido a la falta de seguridad en las presas, las intervenciones antrópicas en los desagües, el estrangulamiento de los lechos de los ríos, la sedimentación o, principalmente, el déficit regulatorio de la Ley Ambiental en la ocupación aleatoria de áreas de protección permanente (Ni, Sun, Tianhong, Huang & Borthwick, 2010).

La situación es preocupante, hasta el punto de que las Naciones Unidas señalan que en el año 2050 el 45% de la población no tendrá suficiente agua para su consumo. Teniendo en cuenta que las inundaciones ocurren debido a una combinación de varias condiciones hidrológicas, climatológicas y de uso del suelo, el presente estudio tiene como objetivo comprender los efectos de este proceso a largo plazo, ya que las inundaciones pueden afectar directamente la salud y el bienestar de los seres vivos.

2. FRECUENCIA DE INUNDACIONES Y CONSECUENCIAS

Se espera que los inviernos se vuelvan más húmedos, con aumentos en la frecuencia e intensidad de la lluvia. Las inundaciones, ahora consideradas extremas, se volverán más comunes en el futuro. Es necesario adaptarse a estos cambios e introducir un enfoque nuevo y sostenible para la gestión de inundaciones que funcione con la naturaleza y no en contra de ella. La gran mayoría de los desastres son el resultado de una sinergia de factores naturales y antropogénicos (desastres mixtos o híbridos), sin que se perciba una de estas, pero más bien una combinación de factores híbridos en un fenómeno de grandes proporciones (Carvalho & Damascena, 2013). Responsables de daños y pérdidas significativas, de naturaleza social, económica y ambiental, Graziano Neto & Vedonello (2009, p. 10) afirman que:

> *Los desastres naturales han sido recurrentes y han tenido un impacto cada vez más intenso, lo que los científicos sugieren que ya es el resultado del cambio climático global. Los fenómenos naturales de los desastres naturales se denominan cuando afectan directa o indirectamente a las regiones habitadas, causando algún tipo de daño o impacto en la sociedad. En Brasil, la mayoría de los desastres naturales son causados por la dinámica de la Tierra, que es impulsada por el clima y los procesos atmosféricos.*

Tales eventos incluyen impactos directos en las propiedades biológicas, químicas y físicas de ríos, suelos y ambientes ribereños. A menudo, las inundaciones conducen a la contaminación de la red pública de suministro de agua y la población utiliza esta agua exponiéndose al riesgo de ingerir bacterias, virus y parásitos. En relación con la salud humana en las áreas afectadas, existe la posibilidad de sufrir enfermedades transmitidas por el agua, como infecciones por *E. Coli, Giárdia y Shigella*, cólera, fiebre tifoidea, viruela, hepatitis A y E, polio, malaria, fiebre amarilla, fiebre

hemorrágica o dengue, entre otras, como resultado del transporte de desechos orgánicos, contaminación química y alteración en los ciclos de reproducción de vectores, huéspedes y reservorios de enfermedades (Carvalho & Damascena, 2013). Además de estas enfermedades, en gran medida relacionadas con el saneamiento ambiental inadecuado, también hay un aumento de la humedad en el mismo período, con un rápido crecimiento de microbacterias (como *Mycobacterium marinum*) y proliferación de hongos (Freitas & Ximenes, 2012).

El fenómeno de las inundaciones puede conllevar cambios ambientales adversos que generan pérdida de vidas y propiedades. Aunque tal evento no ponga en peligro la vida, sí generará estrés colectivo y graves disturbios en la comunidad, incluso después de mucho tiempo. Las inundaciones repentinas generan impactos repentinos y masivos, mientras que las inundaciones que ocurren gradualmente pueden permitir un período más largo para la evacuación y la protección de las propiedades (Ferreira, 2017).

Según Ni et al. (2010), los impactos de las inundaciones se evalúan en términos de su extensión en las llanuras de inundación (profundidad máxima y duración de las inundaciones); velocidad de flujo y tasa de aumento en los niveles de inundación. Los impactos ambientales de las inundaciones pueden ser bastante amplios, desde la dispersión de desechos domésticos de bajo nivel en el sistema fluvial, hasta la contaminación del suministro de agua de la comunidad y los hábitats de vida silvestre con sustancias extremadamente tóxicas. Por otro lado, las actividades de preparación para inundaciones, como los sistemas de pronóstico y advertencia, pueden ayudar a prevenir algunos de estos impactos.

De hecho, las acciones emprendidas antes del evento tendrán un impacto en el nivel de daño resultante de la inundación. Las acciones correctivas efectivas, como los sacos de arena, pueden reducir significativamente las pérdidas y, con la planificación, evitar algunos de estos impactos ambientales secundarios. Específicamente, quitar los tanques de combustible y prestar atención a los desechos peligrosos eliminaría algunos de los posibles problemas (Abolade et al., 2013).

Por otro lado, la atención inadecuada a estos componentes del riesgo de inundación conducirá invariablemente a problemas adicionales e intensificará los impactos ambientales adversos. Asimismo, durante una inundación, variables como la profundidad del agua, la velocidad del flujo y la duración de la inundación, en combinación con los atributos del uso del suelo, contribuyen a la gravedad relativa del impacto de la inundación (Tanaka & Ruschel, 2012).

Es probable que las inundaciones de mayor profundidad provoquen un mayor daño ambiental que las inundaciones de menor magnitud, en parte porque se ha inundado más área. Las inundaciones, a largo plazo, acrecientan los problemas ambientales, porque la limpieza se retrasará y los contaminantes podrán permanecer en el medio ambiente durante mucho más tiempo. El argumento es el mismo para otras características de inundación, las condiciones extremas pueden cristalizar en otros problemas ambientales adicionales (Shah & Chowdhury, 2018).

Algunas actividades humanas que contribuyen con los efectos negativos de las inundaciones son la construcción de carreteras, casas o edificios que impermeabilizan el suelo. De esta forma, se evita que el agua de lluvia sea absorbida por el suelo y fluya directamente hacia los ríos, aumentando rápidamente su nivel (Santos, 2010). También agrava los impactos negativos la deforestación, ya que la presencia de vegetación ayuda a retener el agua en el suelo y reduce la velocidad de la escorrentía, minimizando las tasas de erosión que causan la sedimentación de los cursos de agua. Adicionalmente, cuando la basura no tiene la disposición adecuada, obstruye los pozos de registro, canales y tuberías que llevarían las aguas al río, inundando áreas que normalmente no fueron invadidas por las aguas. En el río, la basura también puede funcionar como una presa, proporcionando un rápido aumento en su nivel (Tominaga, Santoro & Amaral, 2009).

Se trataría, por tanto, de instituir mecanismos legales para la responsabilidad social, ambiental y de gobernanza, buscando modelos para reestructurar las cuencas hidrográficas, ya sea mediante la reforestación o mediante la restauración de la infraestructura de las comunidades ribereñas y, en consecuencia, la reducción de riesgos (Shah & Chowdhury, 2018). Por lo tanto, las decisiones relacionadas con la planificación del uso de la tierra, la protección contra inundaciones y muchas otras facetas de la vida de las sociedades tendrán un impacto positivo, o seguirán siendo constantemente vulnerables a las catástrofes ambientales.

3. CONSIDERACIONES GENERALES DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

La reducción del riesgo de inundación es una preocupación importante para los países a escala mundial. Una variedad de estrategias de gestión de riesgos de inundación, tecnologías y procesos, en general, incluyen identificación de riesgos, evaluación e intervenciones estructurales y no estructurales para reducir el riesgo de inundaciones (Shah, Rahman & Chowdhury, 2018). Sin embargo, no existe una legislación específica que permita mitigar las acciones antrópicas y que aún deben resolverse en función del contexto geográfico y socioeconómico.

Los objetivos fundamentales compartidos por todos los países de la UE, por ejemplo, y la implementación de la Directiva de inundaciones de 2007 juegan un papel importante para que esto suceda. Las medidas incluyeron formas potencialmente muy económicas de obtener protección contra inundaciones que se benefician de la capacidad de la naturaleza para absorber el exceso de agua. Dichas medidas de infraestructura verde pueden desempeñar un papel importante en la gestión sostenible de los riesgos de inundación en Europa. Las soluciones de beneficio mutuo deben ser el foco de la gestión del riesgo de inundación (Europen Comission, 2020).

La legislación medioambiental de la UE exige la evaluación de opciones medioambientales mejores y viables para los cambios estructurales propuestos en ríos, lagos y costas, si estos cambios pudieran conducir a un deterioro en el estado de estas aguas. La Directiva Marco del Agua, la Directiva de Hábitats, la Evaluación de Impacto Ambiental y la Directiva de Evaluación Ambiental Estratégica establecen estos requisitos y buscan equilibrar el mantenimiento de las necesidades humanas, protegiendo el medio ambiente con el objetivo final de lograr un enfoque sostenible para la gestión del agua (Europen Comission, 2020).

En Brasil, aunque los municipios han sido presionados para establecer un Plan Maestro Urbano, la gran mayoría no contempla aspectos de prevención contra la ocupación zonas de riesgo de inundación. Para la implementación de medidas, ya sean estructurales o no estructurales, se deben tener en cuenta varios factores: aspectos ambientales, hidrológica, uso y ocupación del suelo, características socioeconómicas. Estos factores podrían garantizar un manejo adecuado y eficiente considerando sus aspectos naturales y locales, permitiendo así una mejor convivencia con tales fenómenos (Cesco & Ceolin, 2017).

Sin embargo, en el país, las acciones buscan conocer y mapear estos "desastres naturales", una de las fuentes de datos más relevantes son los decretos de situación de emergencia o el estado de calamidad pública, reconocidos por el gobierno federal. El criterio para declarar una situación de emergencia o estado de calamidad pública se basa en la intensidad de los desastres, así como en la comparación entre la necesidad y la disponibilidad de recursos para restaurar a los municipios a una situación normal (Carvalho & Damacena, 2013; Cesco & Ceolin, 2017).

Debido a la insuficiencia de las acciones que pueden minimizar los impactos de las inundaciones, las grandes pérdidas económicas y el equilibrio de los problemas sociales a resolver, que incluyen los

derechos a la vivienda y la salud, entre otros, nos enfrentamos con el precio cobrado por sociedad de riesgo, tal como la concibió Ulrich Beck (2010, p. 27-28), un escenario de una modernidad tardía en el que los riesgos no se basan en las mismas categorías y fundamentos que antes (espacio y tiempo, empresa y estado nacional, fronteras, entre otros). El resultado de estos eventos adversos, naturales o provocados, sobre un escenario vulnerable, causando graves interrupción del funcionamiento de una comunidad o sociedad con grandes pérdidas y daños humanos, material, económico o ambiental, que excede su capacidad de lidiar con el problema usando sus propios medios (Brasil, 2012).

Es en este campo que, según Tanaka & Ruschel (2012), las tareas principales de la ciencia jurídica, en apoyo de la gestión ambiental, consisten básicamente, en primer lugar, en establecer normas que prevean y desalienten conductas consideradas perjudiciales para los objetivos colimados de protección y recuperación del medio ambiente, el entorno y su compatibilidad con las actividades diarias del ser humano.

4. LA SOSTENIBILIDAD COMO MEDIDA DE MITIGACIÓN DE INUNDACIONES

La relación entre el ser humano y el medio ambiente, basada en el trípode indeseable de falta de compromiso, inagotabilidad e irresponsabilidad, puede cumplir las predicciones más catastróficas con respecto a la escasez de recursos naturales. Por lo tanto, es esencial sustituir una visión basada en los principios de sostenibilidad, racionalización y responsabilidad, dentro de la cual somos parte integral del medio ambiente y responsables de proteger y mejorar la calidad de vida en el planeta. El argumento es que los sistemas globales de "leyes", como tales, se establecen donde los participantes y los observadores codifican las obligaciones normativas en términos de división binaria legal / ilegal, con alguna forma de infraestructura legal y para juzgar el cumplimiento (Trassi et al. 2020).

Por lo tanto, el déficit democrático que resulta de la globalización y la fragmentación de las funciones de gobernanza, surgió en la literatura sobre la democratización de la gobernanza global que puede describirse ampliamente en argumentos que ubican la práctica de la democracia dentro del marco de Westfalia, y que exigen una afirmación de la importancia de la soberanía para proteger la democracia interna; o el establecimiento de un estado global democrático (federal); o el establecimiento de un pacto de paz entre estados democráticos (Neves, 2014).

Para ser reguladores efectivos, es necesario demostrar a las sociedades democráticas, la inclusión de los intereses y las perspectivas de los sujetos al régimen, mecanismos institucionalizados para garantizar la representación de una diversidad de perspectivas en los procedimientos legislativos; toma de decisiones después de deliberaciones razonadas; la adopción de regulaciones compatibles con los estándares internacionales de protección ambiental en su conjunto (Cruz, 2010).

La legitimidad democrática de la ley en la era moderna depende de las siguientes condiciones (ideales): una comunidad internacional de estados democráticos (deliberativos) para las actividades reguladoras globales de los actores no estatales; y la aceptación por parte de cada sistema legal (autónomo) de que debe estructurar sus relaciones con otros sistemas legales en referencia a la idea de autoridad democrática, teniendo en cuenta las lecciones del constructivismo y la elección racional (Pilau Sobrinho, 2017). Y, aunque las inundaciones todavía se consideran desastres naturales, una nueva visión, centrada en la cooperación, en nuevas concepciones de la calidad de vida y la relación de la sociedad, y esto con el medio ambiente, es fundamental para que comiencen a construir conocimiento y mantenimiento efectivo y acciones de preservación ambiental (Boer, 2015).

El tema de la sostenibilidad se ha vuelto indispensable debido a la situación actual en relación con el ser humano y el medio ambiente. Debido a los diversos impactos encontrados en el planeta, accidentes ambientales, consumo inconsciente, contaminación de ríos que causan la muerte de varias especies

de peces, contaminación del suelo, escasez de agua potable, eliminación incorrecta de desechos, quema y gastos excesivos provocados por el ser humano, la preservación de la vida en la tierra se vuelve cada vez más preocupante. Como declaró Pilau Sobrinho (2017, p. 15):

> *Sin embargo, en una sociedad arriesgada, que se centra en la producción de riqueza, los reflejos de esa sociedad son lineales a los reflejos de las sociedades con respecto a su ecuación de riqueza, son reflejos que afectan a todos los grupos sociales, independientemente de las clases sociales. La modernización social alimenta la incidencia de los riesgos sociales, pero de manera reflexiva, porque, al mismo tiempo que promueve el desarrollo, se convierte en un problema, como las innovaciones tecnológicas.*

Por lo tanto, es importante comprender que el calentamiento global, la deforestación, la eliminación de la cubierta vegetal, la explotación de los recursos hídricos, el daño a la salud humana y animal, son factores que contribuyen a las inundaciones (Abreu & Zanella, 2015).

Las medidas para evitar daños por inundaciones se basan en estimaciones de daños y su efectividad puede determinarse cuantitativamente. Sin embargo, estas medidas rara vez son económicas y pueden cambiar el entorno a su alrededor. Por lo tanto, es necesario determinar cómo estas medidas pueden mitigar las inundaciones, especialmente las causadas por la explotación ambiental, y cómo se pueden aplicar para producir los efectos de sostenibilidad deseados (Trassi et al., 2020).

La verdadera conciencia de la preservación del medio ambiente se debe al hecho de que la mayoría de las personas realmente no conocen ni se preocupan por el tema de la preservación del medio ambiente, lo que pone la carga principalmente sobre los hombros de las autoridades para cuidar el medio ambiente. Es necesario revisar la opinión pública y la comprensión del concepto de desarrollo sostenible. Las personas deben comprender y ser conscientes de que pueden desempeñar un papel activo en la protección del medio ambiente (Shah & Chowdhury, 2018). La conciencia por sí sola no es suficiente en ausencia de las medidas necesarias para preservar el medio ambiente y garantizar el éxito de las medidas adoptadas por su preservación. La solución de los problemas ambientales debe tener los tres principios esenciales de preservación que implican conciencia, conocimiento y práctica. Por lo tanto, es imposible para la sociedad ignorante planificar, desarrollar y monitorear el entorno político. Además, la sociedad necesita gestionar los factores de desarrollo: económico y físico, social y cultural, científico y tecnológico, educativo y de aprendizaje, así como las normas y reglamentos para la sostenibilidad continua. Todos deben comprender que el desarrollo sostenible implica un colectivo de varios aspectos de ese desarrollo (Abreu & Zanella, 2015).

Teniendo en cuenta los problemas ambientales, sociales y económicos actuales y futuros, se han tomado iniciativas limitadas para desarrollar herramientas de evaluación y mitigación de inundaciones en las más diversas áreas de riesgo, ya que no existe un mecanismo para validar si la mejor opción alternativa seleccionada será realmente sostenible en el futuro. Se requiere un enfoque sistemático para evaluar el potencial de reducción sostenida del riesgo de inundación mediante proyectos de mitigación, así como para determinar la influencia del proyecto en el desarrollo sostenible.

En la Comunidad Europea, las políticas de protección ambiental y desarrollo sostenible representan un componente esencial de la política a largo y medio plazo. Los objetivos principales de las políticas de la UE abarcan la protección del medio ambiente a través de instrumentos económicos y legislativos, así como la implementación de medidas apropiadas para garantizar la contaminación compensatoria (Europen Comission, 2020).

El desarrollo y la gestión de la tierra, los bosques y otros recursos naturales, de manera sostenible, requiere la asociación de todas las naciones del mundo, la única capaz de garantizar una economía integral y eficiente. La protección y el desarrollo sostenible del medio ambiente representan un concepto que ha obtenido múltiples ventajas en los últimos años, debido a la importancia del desarrollo sostenible que lleva a la sostenibilidad a los niveles global y nacional (Trassi et al., 2020).

Se refiere a la interacción responsable con el medio ambiente para evitar el agotamiento o la degradación de los recursos naturales y para permitir la calidad ambiental a largo plazo. Es un proceso que proporciona un estado futuro deseable para las sociedades humanas, en el que las condiciones de vida y el uso de los recursos continúan satisfaciendo las necesidades humanas sin comprometer la integridad, la estabilidad y la belleza de los sistemas bióticos naturales. La sostenibilidad se asemeja a un sistema vivo en el que los elementos humanos, naturales y económicos son interdependientes y se fortalecen.

Es necesario comprender que el derecho a un medio ambiente ecológicamente equilibrado es un derecho de toda la humanidad y su preservación está directamente asociada con las prácticas de responsabilidad y la promoción del desarrollo colectivo sostenible basado en valores éticos, sociales, ambientales, culturales y políticos, basado en un enfoque científico y analítico para diagnosticar, generar datos y proponer soluciones que minimicen los impactos ambientales causados al medio ambiente natural por las actividades humanas.

CONSIDERACIONES FINALES

El estudio pretendía comprender los efectos a largo plazo de este proceso, ya que las inundaciones pueden afectar directamente la salud y el bienestar de la vida salvaje y humana.

Los impactos causados por las inundaciones incluyen la pérdida de vidas humanas, daños a la propiedad, destrucción de cultivos, pérdida de ganado, fallos en las instalaciones de infraestructura y deterioro de las condiciones de salud debido a enfermedades transmitidas por el agua. Del mismo modo, el efecto directo sobre los activos de producción, ya sea en la agricultura o la industria, puede inhibir regularmente las actividades y conducir a la pérdida de medios de vida. Por lo tanto, las inundaciones se consideran una de las calamidades ambientales que muestran efectos disuasivos sobre la salud humana y devastadoras para el medio ambiente.

Con estos hechos expuestos, está claro que la mejor acción se refiere a la prevención, y esto solo se puede obtener a partir de la difusión de prácticas que resalten severamente una forma consciente de supervivencia, como una de las contribuciones a la sostenibilidad, cuyas leyes deben asistir en la planificación ecológica desarrollando un desencadenante positivo para comenzar con el punto crítico y clave del problema, llamado reeducación ambiental, por el cual las personas, la sociedad y los estados que pretenden vivir en un mundo mejor y con recursos que satisfagan sus necesidades, deben ponerse posición responsable con respecto al uso del medio ambiente.

REFERENCIAS

- Abolade, O., Muili, A. B. & Ikotun, S.A. (2013). Impacts of flood disaster in Agege local government area Lagos, Nigeria. *International Journal of Development and Sustainability*, 2(4), 2354-2367.
- Angeoletto, F., & Santos, J. W. M. C. (2016). Agonizantes: los ríos y arroyos en el contexto ecológico urbano. *Revista Espaço Acadêmico*, 16(183), 104-112.
- Abreu, N. J. A. & Zanella, M. E. (2015). Percepção de risco de inundações: estudo de caso no bairro Guabiraba, Maranguape-Ceará. *Revista OKARA: Geografia em debate*, 9(1), 90-107.

- Beck, U. (2010). *Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade*. Tradução de Sebastião Nascimento. Editora 34, São Paulo.
- Boer, J. (2015). *The sustainable development fight will be won or lost in our cities*. United Nations University, New York.
- Brasil. (2012). Ministério da Integração Nacional. Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos municípios, estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. MI, Brasília.
- Carvalho, D. W., Damacena, F. D. L. (2013*). Direito dos desastres*. Livraria do Advogado, Porto Alegre.
- Castro, A. L. (2003). *Manual de desastres: desastres*. Ministério da Integração Nacional, Brasília.
- Cesco, S. & Ceolin, L. P. S. (2017). Políticas públicas e inundações do rio Uruguai no município de São Borja: o olhar dos atingidos e a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. *Rev. Bras. Ciênc. Polít,* 22(1), 285-328.
- Cruz, Paulo Márcio. (2010). O clima como necessidade de governança transnacional: reflexões pós-Copenhague 2009. *Pensar*, 15(2), 582-602.
- Ferreira, X. C. (2017). *Inundações urbanas: propostas para uma gestão do risco com foco na prevenção de danos.* Trabajo Final de Máster en Derecho Ambiental y de la Sostenibilidad, Universidad de Alicante y Universidade do Vale do Itajaí.
- Europen Comission (2020). *Hacia mejores opciones ambientales en la gestión del riesgo de inundación.* https://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/better_options.htm, en 17 jul. 2020.
- Freitas, C. M. & Ximenes, E. F. (2012). Enchentes e saúde pública – uma questão na literatura científica recente das causas, consequências e respostas para prevenção e mitigação. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(6),1601-1615.
- Graziano Neto, F. & Vedonello, R. (2009). Apresentação. In: *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. Instituto Geológico, São Paulo.
- Neves, Marcelo. (2014). (Não) solucionando problemas constitucionais: transconstitucionalismo além de colisões. *Lua Nova*, São Paulo, 93- 201-233.
- Ni, J., Sun, L., Tianhong, L., Huang, Z. & Borthwick, A. G. L. (2010). Assessment of the sustainability impacts of floods in mainland China. *Journal of Environmental Management,* 91(10),1930-1942.
- Papaioannou, G., Vasiliades, L. & Loukas, A. (2014). Multi-Criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water Resources Management*, 29, 399-418.
- Santos, J. W. M. C. (2010). Mapeamento das áreas de risco de inundação do perímetro urbano de Rondonópolis – MT com emprego de geotecnologias. In: J. W. M. C. Santos (Ed.), *Produção do espaço e transformações socioambientais das paisagens* do Mato Grosso, 7-177. Ed. UFMT, Cuiabá.
- Shah, M. R. A., Rahman, A. & Chowdhury, S. H. (2018). *Challenges for achieving sustainable flood risk management*. Management (CIWEM) and John Wiley & Sons Ltda., 11(2)-S352–S358.
- Tominaga, L. K., Santoro, J. & Amaral, R. (2009). *Desastres naturais: conhecer para prevenir.* São Paulo: Instituto Geológico.
- Trassi, J. S., Santos, J. W. M. C. & Negri, S. S, (2020). Flooding problems and its socio-environmentalimpact on Rondonópolis, MT, Brazil. *Terr@Plural*, 14 (e2013388), 1-21.

LA RAMBLA DE ABANILLA-BENFERRI COMO PARADIGMA PARA EL ESTUDIO DEL CONOCIMIENTO TRADICIONAL RELATIVO AL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE AVENIDA

Juan Antonio Marco Molina
ja.marco@ua.es
http://orcid.org/0000-0003-3431-0499

Pablo Giménez Font
pablo.gimenez@ua.es
http://orcid.org/0000-0002-1171-715X

Ascensión Padilla Blanco
ma.padilla@ua.es
http://orcid.org/0000-0001-9420-9136

Estela García Botella
estela.garcia@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-0131-3282

Antonio Prieto Cerdán
a.prieto@ua.es
http://orcid.org/0000-0002-6086-6290

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física,
Universidad de Alicante, España

RESUMEN

El aprovechamiento tradicional de las aguas de avenida, mediante presas de derivación y complejas redes de boqueras, generó un milenario sistema de organización hidrogeomorfológica en las cuencas vertientes del sureste peninsular. Tal fue su implantación e importancia territorial que, durante siglos, en barrancos y ramblas se implantó una dinámica ecoantrópica en la que las avenidas fluviales se convirtieron en un valioso recurso para la agricultura, reduciendo su peligrosidad. Con el abandono de los sistemas de laminación, la alteración de cursos fluviales y los intensos cambios de usos del suelo, se ha incrementado la peligrosidad de estos cursos fluviales intermitentes, en la mayor parte de los cuales la antigua dinámica ecoantrópica ha sido substituida por otras más descontroladas y caóticas. En el presente trabajo, centrado en el último tramo de la rambla de Abanilla-Benferri (provincia de Alicante), se plantean las bases necesarias para la elaboración de una cartografía geomorfológica, de carácter multitemporal, partiendo de la fotografía aérea de 1929-1930. Como objetivo general, se pretende comprender mejor el funcionamiento histórico de la rambla con el sistema de boqueras activo, así como las consecuencias derivadas de su desorganización. Por primera vez, se realiza una estimación del volumen de agua laminada por este, resultando una diferencia de entre el 28 % y el 42 % del total del caudal vertido por la rambla durante la riada de septiembre de 2019.

1. INTRODUCCIÓN

Resulta indudable la importancia de la cartografía geomorfológica para entender el funcionamiento de los sistemas fluviales y como base para realizar estudios de inundabilidad eficaces a través de análisis hidrológico-hidráulicos. En todo ello, resulta fundamental el análisis histórico y la detección de evidencias –efímeras, topográficas y sedimentológicas- generadas por la circulación de las aguas sobre los terrenos inundables (Sánchez y Lastra, 2011). Pese a las intensas transformaciones sufridas por los cauces en las últimas décadas, a raíz de la implantación de infraestructuras hidráulicas y los cambios en los usos y coberturas del suelo, se hace necesaria una cartografía de carácter retrospectivo hasta donde las fuentes disponibles puedan arrojar datos de precisión.

Partiendo de esta premisa, se plantea una cartografía geomorfológica preliminar para la rambla de Abanilla-Benferri, a partir de fotografías aéreas de 1929-1930 y documentos catastrales y cartográficos de principios del siglo XX. Se conoce como rambla de Abanilla o Benferri al último tramo del río Chícamo, principal curso de la cuenca de Fortuna-Abanilla que, con 255 km^2, está limitada por altitudes máximas que rozan los 1000 msnm (Manzano, 1987). Se trata de un excelente ejemplo de rambla mediterránea, tanto en su sentido geomorfológico como hidrológico, con un elevado dinamismo intrínseco a su naturaleza, pero con un destacado proceso de degradación ambiental desde la segunda mitad del siglo XX que ha deteriorado el equilibrio ecoantrópico del sistema fluvial.

Este hecho ha podido reforzar su papel como uno de los actores principales de las inundaciones de la Vega Baja del río Segura, con especial protagonismo en la última inundación de septiembre de 2019.

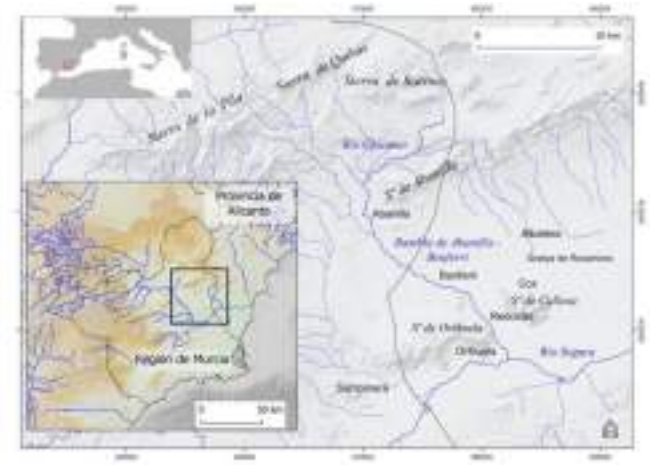


Figura 1. Localización de la cuenca del río Chícamo o Rambla de Abanilla-Benferri, contextualizada en la cuenca hidrográfica del río Segura. Fuente: CHS e ICV. Elaboración propia.

No obstante, en el área de estudio hay que tener en cuenta la coevolución morfológica que la rambla ha tenido con la construcción y organización de un sistema de boqueras plurisecular (De Gea et al., 2012), sistema que presenta un claro sentido geomorfológico si se atiende a la presencia de abanicos y otras áreas de derrame. El milenario sistema de riegos de turbias, asociado preferentemente a ramblas y cauces intermitentes, estaba organizado para desviar, mediante presas y boqueras, el manto pluvial de las crecidas sobre las terrazas de cultivo (Morales Gil, 1968-1969). Esta laminación tenía unas consecuencias fundamentales sobre la reducción de las puntas de crecida y el avenamiento. Un aspecto que, aunque conocido, todavía espera estudios que permitan cuantificar su verdadero alcance, tanto desde el punto de vista del papel que su abandono ha jugado en la génesis de las riadas más recientes, como en las posibilidades de utilizar este conocimiento tradicional –verdadero sistema de

regulación y ordenación hidrogeomorfológica de las cuencas vertientes del sureste peninsular- para consolidar una sociedad más resiliente ante determinados riesgos naturales (Marco Molina y Box Amorós, 2019). En este sentido, se trata de continuar con la notable producción científica que, sobre el riego de turbias, se viene realizando por parte de geógrafos españoles en las últimas décadas (Morales Gil, 1968-1969; Box Amorós, 1985; Morales Gil y Box Amorós, 1986; Morales Gil et al., 1988; Vera Rebollo y Marco Molina, 1988; Box Amorós, 1990; Morales Gil et al., 1991; Marco Molina, 1993; Morales Gil y Box Amorós, 1995; Marco Molina y Morales Gil, 1995; Marco Molina et al., 1996; Mondéjar Sánchez, 2009; Hernández Hernández y Morales Gil, 2013; Morote, 2013; Del Río, 2016), pero atendiendo a las posibilidades de recuperación, restauración y, sobre todo, la toma de conciencia de la importancia ambiental de este modo de organización tradicional del espacio.

En esta ponencia se presentan los primeros resultados para el último tramo de la rambla de Abanilla-Benferri, desde Casas Nuevas (Benferri), en la frontera de la provincia de Alicante, hasta sus diferentes desembocaduras en Orihuela, Redován y Granja de Rocamora.

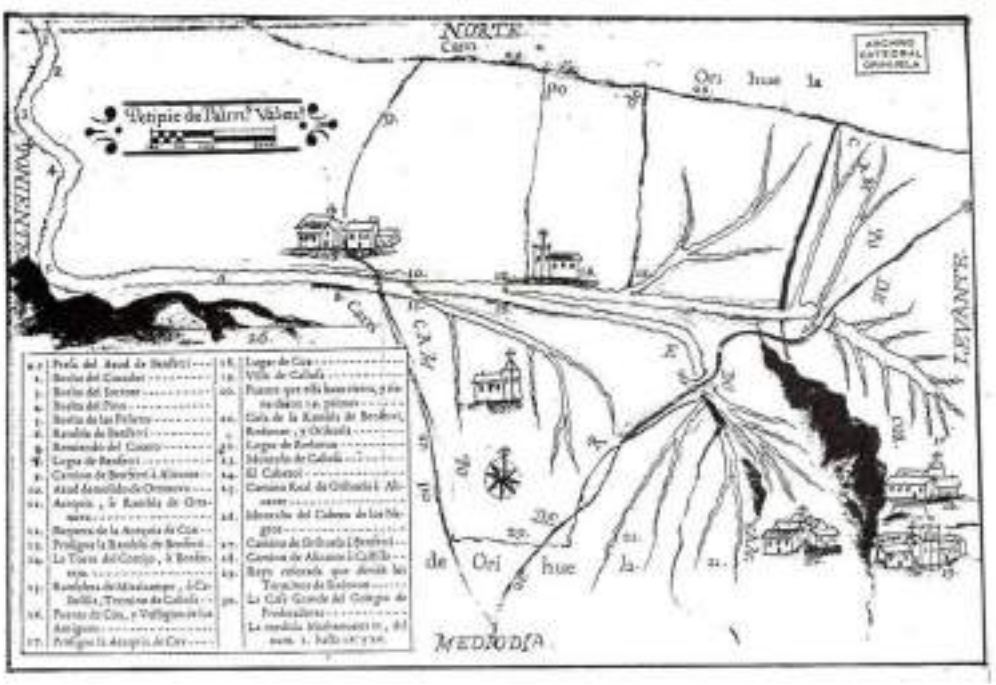


Figura 2. Los numerosos pleitos generados por los desbordamientos de la rambla han dejado una rica documentación durante el siglo XVIII. Existen varias versiones de este mapa del área de estudio. Fuente: original del Archivo de la Catedral de Orihuela, reproducido en Gil Olcina y Canales, 1988:202.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La hipótesis de partida supone que la peligrosidad de la rambla es cada vez mayor; y que esa peligrosidad creciente tiene su fundamento básico en el progresivo abandono y desorganización del sistema de riegos de turbias. Esto obliga a entender de forma precisa el funcionamiento del sistema fluvial en el presente y, también, en el pasado, cuando la rambla era un sistema controlado por los aprovechamientos de las aguas de avenida. Partiendo de esta hipótesis general, se plantean las bases necesarias para la elaboración de una cartografía geomorfológica, de carácter multitemporal, que atienda al significado morfológico del riego de boqueras y las consecuencias de su abandono, junto a las importantes transformaciones realizadas durante la segunda mitad del siglo XX.

De manera más concreta se pretende llegar a estimar cuál era el grado de laminación que podía suponer el funcionamiento normal del sistema de riegos con aguas de avenida. Para ello, se considera fundamental poder obtener una imagen o foto fija de la dinámica ecoantrópica de la cuenca, en su tramo más bajo, en circunstancias de funcionalidad del sistema de laminación mencionado. Son, pues, objetivos fundamentales la reconstrucción de la red de boqueras, presas, azudes y partidores, así como llegar a una aproximación de la superficie beneficiada por los débitos –tanto líquidos como sólidos- derivados desde el cauce principal de la rambla objeto de estudio. Al tiempo que también se esbozan las posibilidades que derivan de identificar y cuantificar las modificaciones antrópicas que han afectado, en especial, al cauce principal y a algunas de sus derivaciones.

3. METODOLOGÍA

Para la elaboración del trabajo se han empleado algunas de las denominadas Técnicas Tradicionales de Información Geográfica (TTIG) caracterizadas por la fotointerpretación diacrónica y retrospectiva, el manejo de documentación histórica y la recopilación toponímica; aspectos que habría que completar con trabajo de campo de verificación y encuesta (Marco Molina, 2016).

La fuente principal ha sido el denominado "Vuelo de Ruiz de Alda" (1929-1930), uno de los primeros vuelos fotogramétricos de España que la empresa CEFTA realizó para la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). Actualmente, se halla disponible en forma de ortomosaico georreferenciado mediante conexión WMS (CHS) y los fotogramas se pueden descargar individualmente en la Fototeca del CNIG. Tratándose del vuelo más antiguo presenta, además, un detalle excepcional por haberse volado a escasa altitud: la escala aproximada es de 1:10.000 y la ortofoto tiene 40 cm de píxel. Junto a ello, algunos fotogramas evidencian la concurrencia de una avenida reciente, lo que incrementa su valor para la interpretación geomorfológica. Por el momento, se desconoce la fecha exacta del vuelo, posiblemente realizado entre noviembre de 1929 y mayo de 1930 (Moratalla, 2015), pero los fotogramas registran dos momentos diferentes, destacando aquellos en los que la acumulación de agua y rasgos morfogenéticos vinculados a la erosión y el aluvionamiento son muy recientes (figura

4). De esta forma, el vuelo de 1929 tiene, junto a su precisión, la ventaja de ofrecer una imagen de un sistema plurisecular de aprovechamiento de turbias momentos después de su funcionamiento tras un evento de magnitud considerable.



Figura 3. La intensa actividad sedimentaria de la rambla está documentada desde hace siglos. En 1490, Redován «*no era más de una grande alquería, y debía ser harta mejor tierra y más huerta de lo que es hoy, porque la acequia de Escorratel iba por mucho más arriba; pero con las avenidas de la rambla crece y se alza la tierra y decrece la huerta faltándole la agua*» (Bellot, 2001: 180-181). Actividad que se refleja en esta imagen de las áreas de derrame del Ramblar y rambla de la Culebra sobre la vega del Segura, una imagen contemporánea al "Vuelo de Ruiz de Alda" (António Passaporte, 1927-1936). Fuente: archivo LOTY. Fototeca del Patrimonio Histórico.

Esta información se ha acompañado de los bosquejos planimétricos del Instituto Geográfico y Estadístico (1898 - 1930), del estudio de De Gea, Moñino, Marín y Marco (2012) para la verificación de determinadas boqueras, junto con las Series A y B del Vuelo Americano (1946 y 1956, respectivamente), en especial, en el segundo caso por estar, igualmente, georreferenciado. Mientras que, para la situación actual, se ha utilizado la ortofotografía de 2019 (PNOA), anterior a la riada de septiembre de ese mismo año.

Aunque los cambios actuales son muy profundos en el plano topográfico, se ha empleado el vuelo LiDAR de 2009 (Institut Cartogràfic Valencià) para la obtención de curvas de nivel de 2 m en algunos sectores donde se presentaban dudas a la hora de definir determinados límites, como sería el caso de los abanicos.

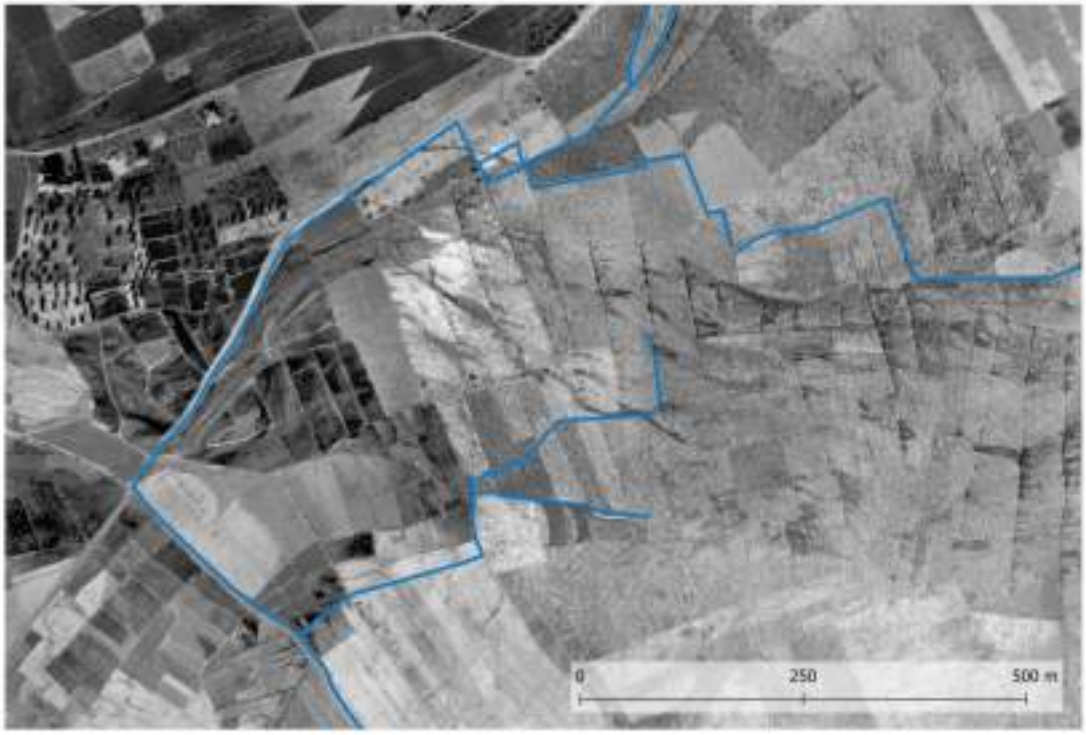


Figura 4. Detalle de un fotograma del Vuelo de Ruíz de Alda donde aparece un área de derrame reciente, que claramente ha superado la capacidad de laminación controlada de las boqueras (con línea azul). Fuente: CHS, elaboración propia.

Teniendo en cuenta que no se dispone de una cartografía geomorfológica a una escala suficientemente detallada, un punto de partida ha sido la publicada por Díez et al. (2003) a escala 1:100.000. Los elementos geomorfológicos considerados en la fotointerpretación han sido: el cauce principal de la rambla, con sus taludes y márgenes fluviales; la "rambla-boquera" (concepto definido para aquellas boqueras principales cuyo origen puede relacionarse con canales fluviales secundarios); la red de boqueras; las cañadas (cauces de fondo plano, aterrazados para su aprovechamiento agrícola); las terrazas fluviales (que no aparecen en la figura 5 por la escala de representación); las áreas de derrame y conos; junto con los abanicos aluviales y aluvio-coluviales (estos últimos relacionados con los que descienden desde las sierras de Orihuela y Callosa).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

En esta fase inicial, se presenta un esquema cartográfico realizado a partir de fotointerpretación en el que se representan los principales elementos geomorfológicos anteriormente comentados (figura 5). Destaca, al respecto, la configuración de una densa red de cañadas que descienden desde la Sierra de Abanilla, así como la presencia de grandes abanicos generados por la rambla y sus bifurcaciones (ramblas-boquera). Se señalan las zonas de derrame más evidentes, a esta escala de análisis, relacionadas con la avenida captada por el Vuelo de Ruiz de Alda y que llegaron a desbordar la capacidad de laminación de algunos sistemas de boqueras. Igualmente, se localizan las denominadas como "áreas piloto" por tratarse de sectores que sintetizan muy bien el comportamiento del sistema fluvial, así como las transformaciones sufridas en el cauce principal y áreas de derrame-desembocaduras en Orihuela y Redován.

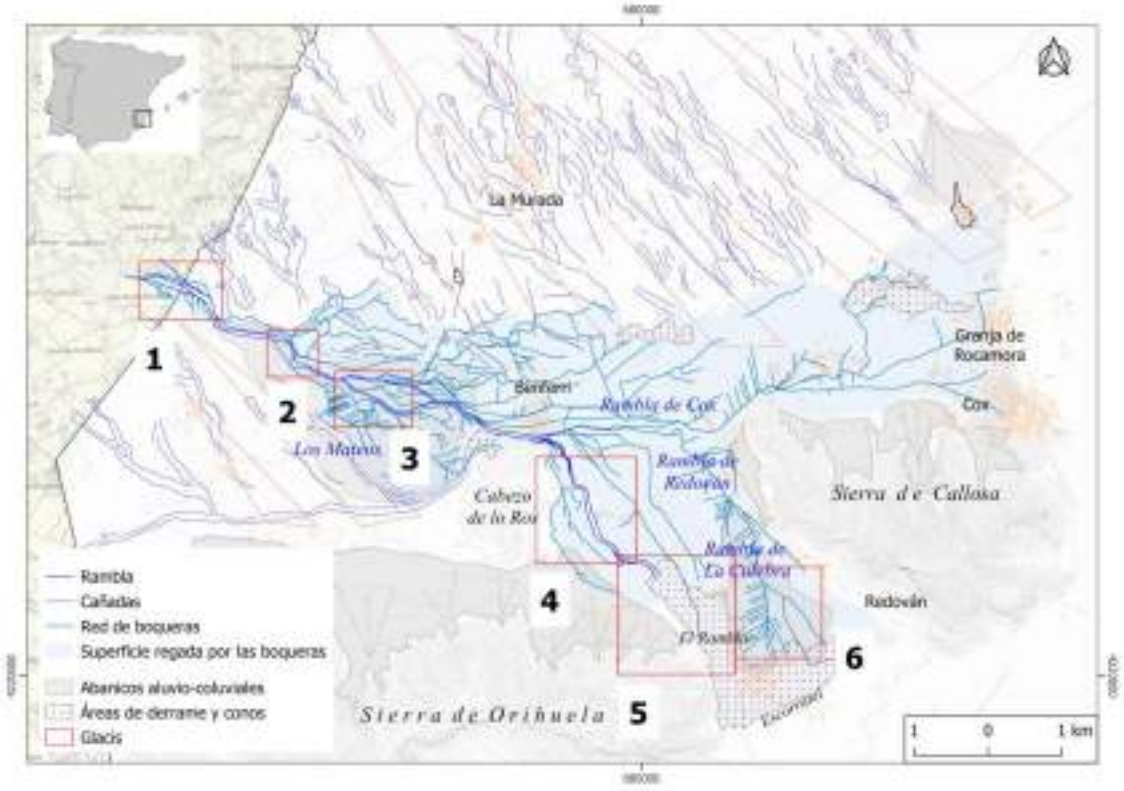


Figura 5. Cartografía geomorfológica preliminar con áreas piloto seleccionadas. Fuente: elaboración propia a partir de fotointerpretación.

De la fotointerpretación y análisis cartográfico se extraen numerosas evidencias que denotan un elevado dinamismo. Principalmente, destaca un amplio lecho (elevado índice altura/profundidad) de tipo braided cubierto de cantos, gravas y arenas, donde se intuyen barras de canal e incluso islas, aunque la mayoría de estos elementos han sido modificados por la reciente crecida de 1929 o 1930. En consonancia con la morfología braided, los márgenes son verticales y mayoritariamente inestables; morfogénesis habitual que se manifiesta con la ampliación del cajero mediante descalces y vuelcos (*timbes*) o procesos de acarcavamiento. La mayoría de las presas en el lecho son irreconocibles, posiblemente porque han desaparecido tras la riada, lo que indica que muchas de ellas eran construcciones temporales. Hay excepciones como los restos de infraestructuras de derivación que se aprecian en Los Partidores o, singularmente, el azud o paredón de Benferri (figura 6), ya mencionado en el siglo XIII, que daba nacimiento a las ramblas de Cox, Redován y la Culebra.



Figura 6. Foto del azud o paredón de Benferri tras la riada de septiembre de 2019. Esta infraestructura da nacimiento a la denominada "rambla de Cox". Fuente: elaboración propia.

Las anteriormente mencionadas "áreas piloto" presentan detalles morfológicos de interés y evidencias de actividad reciente, extrapolable al resto del área de estudio, como formas sedimentarias o depósitos de desbordamiento (erosión de la cubierta edáfica) o escarpes erosivos netos recién creados por la inundación. Siendo interesantes todos estos aspectos, es preciso resaltar la comparación traída hasta la situación actual, donde se reflejan las transformaciones sufridas por el cauce principal hasta fechas inmediatamente anteriores a la riada de septiembre de 2019. A continuación, se realiza un análisis más detallado de cada una de ellas, comparando los vuelos de Ruíz de Alda (1929-1930), la Serie B del Vuelo Americano (1956) y una ortofotografía de 2019 (PNOA), previa a la avenida de septiembre de dicho año, como ya se ha indicado.



Figura 7a. Sector 1 (Casas Nuevas), Vuelo de 1929-1930. Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

El área "piloto" o sector 1 se localiza prácticamente donde entra la rambla de Abanilla-Benferri en la provincia de Alicante, en el paraje conocido como Casas Nuevas (figura 5). En la fotografía correspondiente a 1929-1930 (figura 7a), es reconocible la morfología típica de lecho braided con alternancia de canales y barras definidas en los materiales del fondo. Tramo curvo cuya margen convexa (derecha) está constituida por la terraza baja, ocupada para el cultivo y beneficiada con una boquera. La anchura del cauce principal, incluidos taludes, oscila entre 40 y 55 m a lo largo del desarrollo de la terraza, mientras que, aguas abajo, su anchura se amplía progresivamente desde 60 m a casi 95 m. No menos interesantes son algunos rasgos morfológicos de ambas márgenes. La margen izquierda aparece escarpada y acarcavada, en la primera mitad de su desarrollo, y sin acarcavar, aguas abajo; la margen derecha se resuelve en un talud a lo largo de la terraza, mientras que es escarpada, a continuación.

Por último, son bien visibles los signos de escorrentía laminar en la terraza, aparentemente, por desbordamiento de la boquera que afecta a más de la mitad de la terraza.



Figura 7b. Sector 1 (Casas Nuevas), Vuelo de 1956. Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

Por lo que respecta a la imagen del vuelo de 1956 (figura 7b), la terraza ha sido ganada prácticamente en su totalidad en favor del cauce principal, de manera que, además de los surcos principales -más oscuros-, se define un canal secundario entre la parte más alta de la margen derecha y la terraza; muy probablemente derivado del encajamiento y aluvionamiento de la antigua boquera, que ha evolucionado a un canal más del cauce principal. Queda definido, así, el lóbulo del tramo convexo como una "isla" en la que apenas emergen una decena de árboles.

Con todo, el cauce se ha ampliado considerablemente (posiblemente efecto de las riadas de 1946 y 1947), ya que de los 45-50 m mensurables en el vuelo anterior, ha pasado a tener de 75 a casi 130 m en la antigua terraza; mientras que aguas abajo también se aprecia una cierta ampliación.



Figura 7c. Sector 1 (Casas Nuevas), Vuelo de 2019 (marzo). Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

Por último, en el sector 1, en la ortofoto de marzo de 2019 (figura 7c), resulta difícil reconocer cualquier vestigio del lecho braided de los fotogramas antiguos. En lugar de un lecho refulgente, resultado de la resolución que determinaban el acarreo de los materiales del fondo, completamente desprovistos de vegetación, en la actualidad, destaca el predominio de un lecho casi ocupado en su totalidad por vegetación. Pero lo más sobresaliente es el estrangulamiento que ha experimentado el cauce, puesto que, en el mejor de los casos, ronda los 70 m de anchura; mientras que, el estrangulamiento ha deparado anchuras entre 45 y 50 m, con un acusado estrechamiento en el que apenas si llega a los 25 m de anchura. Circunstancias que derivan, por lo que se puede observar en la ortoimagen, del relleno y regularización que se ha llevado a cabo de la antigua terraza baja o lóbulo.

El análisis del resto de las áreas piloto, para esta ocasión, solo se ha planteado como diagnóstico y muestreo de las alteraciones que ha podido sufrir la red de avenamiento de la rambla, en especial, en su cauce principal. Se plantea, de este modo, un esbozo de catálogo de los procesos antropogénicos que han podido influir, igualmente, en un aumento de la peligrosidad de las avenidas de la rambla.

De este modo, se ha querido obtener un diagnóstico rápido desde el tramo más alto, sector 1, ya analizado, hasta dos de sus desembocaduras:

- Sector 2: identificado por el topónimo Isla Nueva (figuras 5 y 8). Aquí los procesos observados son similares a los señalados en el caso anterior, es decir, una cierta ampliación del cauce en relación con la dinámica fluvial ligada a episodios de crecida (1947, principalmente) entre la imagen de 1929-1930 y la de 1956 y, al igual que en el tramo anterior de Casas Nuevas (figura 7c), la fotografía actual demuestra que el estrangulamiento del cauce no ha sido un hecho localizado. La reducción del cauce llega a ser del orden de los 30 m. Siendo esta la principal alteración, no se debe desdeñar otras transformaciones observadas que, del mismo modo, son fundamentales para comprender y justificar el aumento de la peligrosidad de la rambla. Por un lado, se puede observar una boquera que tiene su arranque en la margen derecha de la rambla, casi en el mismo borde de la imagen, visible en los fotogramas más antiguos, mientras que, en el actual, queda perfectamente definido un camino en su lugar. Y, por otro lado,también en las dos imágenes del siglo pasado se aprecia lo que

se ha interpretado como un posible paleocauce de la propia rambla o, incluso, una antigua boquera que recibe el nombre de rambla de los Mateos y que, como le sucede al cauce de la rambla de Abanilla-Benferri, ha sido elidido por los aterrazamientos y, en su lugar, se observa el Camino del Alto del Pino que, aguas abajo, se convierte en el Camino de la Rambla de los Mateos.



Figura 8. Sector 2 (Isla Nueva). De izquierda a derecha: imágenes correspondientes a los vuelos de 1929-1930, 1956 y 2019. Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

- Sector 3: área identificada con el expresivo topónimo de Los Partidores (figuras 5 y 9). Este sería un ejemplo magnífico de cómo el sistema de riegos de turbias ha perdido prácticamente toda su vigencia, puesto que el topónimo se puede considerar como fósil. Los Partidores han dejado de tener la función de desviar los caudales, hasta el punto de dejar sin efecto la difluencia-isla de la Cañada del Conde. Solo funciona como cauce el brazo principal, es decir, el más meridional; mientras que, el septentrional, está colmatado artificialmente, de manera parcial. Además, huelga decir que el cauce también ha sufrido un estrechamiento apreciable.

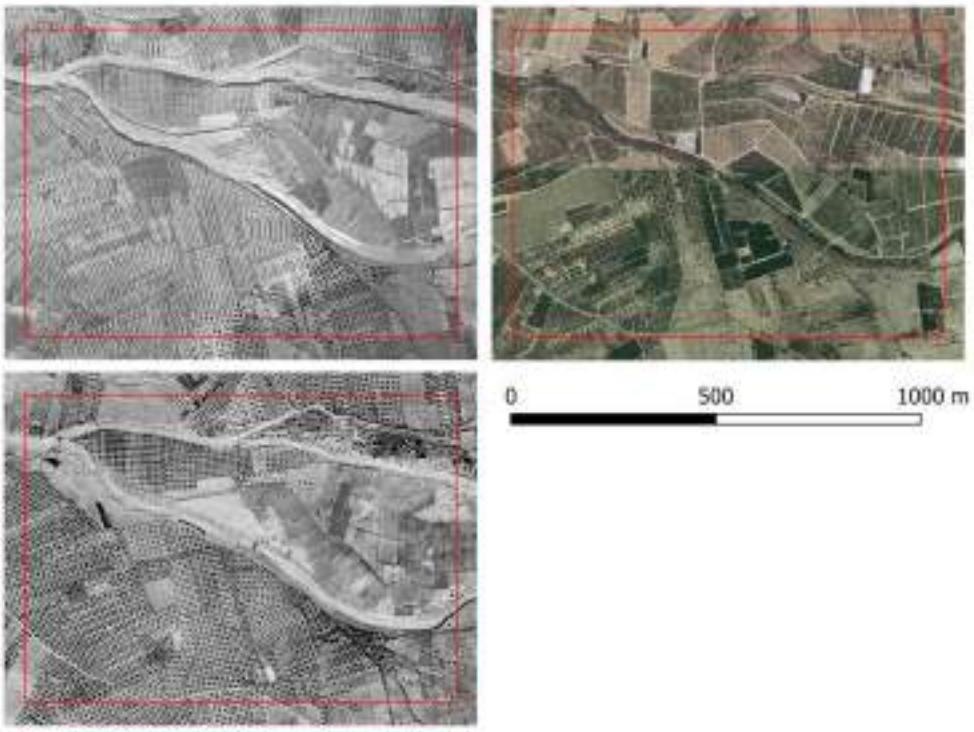


Figura 9. Sector 3 (Los Partidores). Imágenes correspondientes a los vuelos de 1929-1930 (izquierda superior), 1956 (izquierda inferior) y 2019 (derecha). Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

- Sector 4: Este tramo se localiza aguas abajo del azud de Benferri, en el paraje de Los Ros (figuras 5 y 10). Nuevamente otro tramo en el que el estrangulamiento del cauce es más que evidente, puesto que se ha pasado de una morfología, caracterizada por un cauce bien definido en el que sus márgenes escarpadas aparecen sometidas a severos procesos de erosión (acarcavamiento), a una artificialización completa del mismo basada en la pérdida de espacio efectivo para la escorrentía concentrada del lecho mediante el estrechamiento progresivo y aterramiento del primitivo cauce, hasta su desaparición en la zona más baja.
-

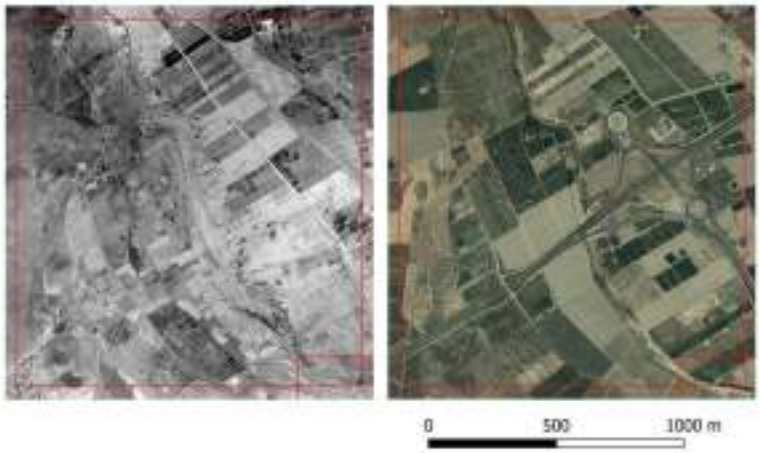


Figura 10. Sector 4 (Los Ros). Imágenes correspondientes a los vuelos de 1929-1930 (izquierda) y 2019 (derecha). Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

- Sector 5: se trata del paraje oriolano de Puente Alto, área que viró muy conocida tras la riada de septiembre de 2019 (figuras 5 y 11). Se comprueba que el final de una rambla, eficazmente manejada y controlada y que, gracias a ese control, se transformaba en cañada y, aguas abajo, se constituía en un "derramador" que ocupaba una zona bastante amplia en el pasado (1929-1930 y 1956). En la actualidad se ha visto estrangulada y confinada por el estrechamiento y modificación topográfica determinada por las infraestructuras viarias. Se ha transformado un tramo cuya escorrentía era laminar o en manto (acumulativo), en otro, concentrado e incapaz de asumir la magnitud de los caudales generados y, por lo tanto, desbordando y aumentando su capacidad de arrastre. Consecuencias de la transformación que están reforzadas por los cambios, ya señalados en el tramo anterior.

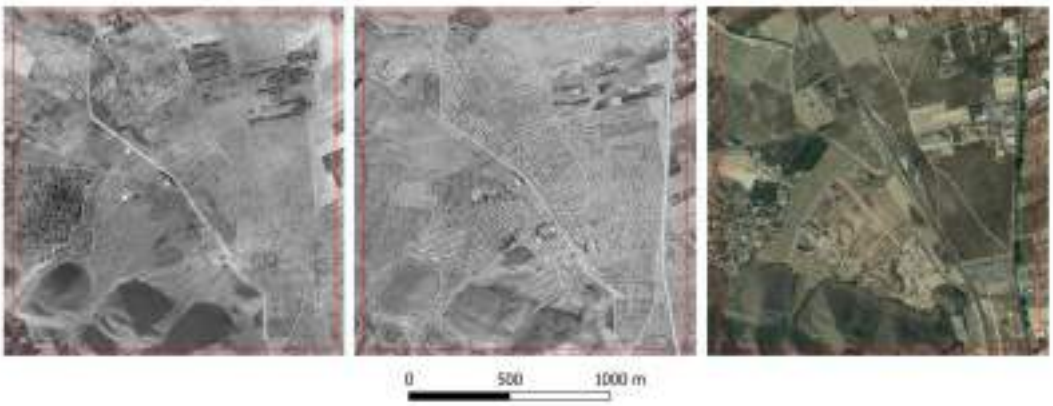


Figura 11. Sector 5 (Puente Alto). De izquierda a derecha: imágenes correspondientes a los vuelos de 1929-1930, 1956 y 2019. Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

- Sector 6: se corresponde con la terminación de las ramblas de Redován y de la Culebra (figuras 5 y 12). Red difluente de boqueras del tramo bajo de las ramblas de Redován y de la Culebra que replicaba la morfología típica de un abanico aluvial (imágenes de 1929-1930 y 1956), que está completamente desarticulado y desorganizado en la ortoimagen actual en un espacio que ha pasado a tener un uso más residencial que agrario, con lo que la exposición al peligro de avenidas se ha multiplicado exponencialmente.

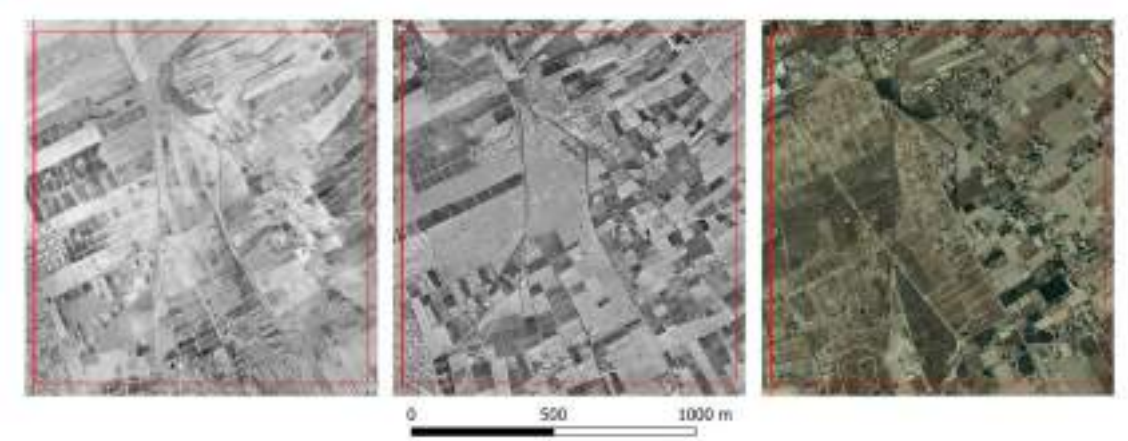


Figura 12. Sector 6 (Ramblas de Redován y la Culebra). De izquierda a derecha: imágenes correspondientes a los vuelos de 1929-1930, 1956 y 2019. Fuente: elaboración propia a partir del portal de la CHS (conexión WMS).

A modo de resumen de lo observado en las seis áreas piloto, se aprecia que hay dos fenómenos que se repiten prácticamente en todos los casos: por un lado, resulta muy evidente la pérdida de superficie conceptuable como cauce; y, por otro, la eliminación de gran parte de las boqueras reconocibles en los fotogramas más antiguos. Las consecuencias de la primera de las alteraciones son un objetivo para el futuro, pero respecto a la red de boqueras del sistema tradicional de riego de turbias, es momento de resaltar su importancia.

Resulta absolutamente necesario destacar que su abandono y eliminación, no sólo suponen una prácticamente irreversible pérdida patrimonial, sino que es, sin duda, una de las principales causas del aumento de la peligrosidad de las avenidas de la rambla. Del sistema de riego por boqueras, el interés básico, va más allá de la dimensión conceptual y patrimonial del mismo. Se colocó como objetivo principal la reconstrucción de la red de boqueras y de las superficies que serían beneficiadas con las aguas de avenida, porque lo que resulta de sumo trascendencia desde el punto de vista del funcionamiento de la rambla, no es otra cosa que la dimensión espacial del sistema (figura 5).

Aplicando la lógica de la hipótesis de partida, se ha realizado una aproximación al caudal que, históricamente, podría haber laminado el sistema: los primeros cálculos arrojan una superficie regada de 2820 ha. Dependiendo de la altura del caballón empleado para retener el agua en los bancales, se han obtenido estos resultados generales, de carácter preliminar para dicha superficie total:

Caballón (cm)	Caudal acumulado (hm^3)
20	5.64
25	7.05
30	8.46

Tabla 1. Estimación de caudales desviados por la red de boqueras según la altura de los caballones. Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que, en la inundación de 2019, se ha estimado en 20 hm^3 el caudal evacuado por la rambla, el sistema activo podría haber reducido entre un 28,2 % y un 42,3 % el total de dicho caudal. En términos generales, sirva como ejemplo la avenida del 7-10 de diciembre de 1965: una inundación generada fundamentalmente en la Vega Baja con desbordamiento de la rambla de Abanilla, en la que se evacuaron por Guardamar 55 hm^3 en cuatro o cinco días (Rosselló, 1989). Por otro lado, tanto para las catastróficas riadas de 1905 como la de 1947, se estima que la rambla de Abanilla evacuó 6 hm^3 (Melgarejo, 1995). Un periodo en el que el sistema de boqueras era funcional y, por tanto, se trata de una cifra a la que habría que sumar las estimaciones anteriormente descritas.

5. DESARROLLO FUTURO

Siguiendo las fases de elaboración de cartografía geomorfológica, son necesarias las fases de verificación en el campo para confirmar o modificar las hipótesis de partida y finalizar de forma definitiva el mapa geomorfológico de 1929-1930. Partiendo de esta cartografía base, la realización de mapas posteriores permitirá seguir los cambios morfológicos detectados en diferentes periodos históricos atendiendo, además, al impacto de grandes avenidas: para las Series A y B del vuelo Americano (1946, 1956) se puede valorar las consecuencias de la avenida de abril de 1946 y, especialmente, la de 28 de septiembre de 1947 y las menores de 1949 y 1950; el vuelo de 1969 (CHS) es especialmente interesante tras las intensas y repetidas crecidas de la rambla entre 1965 y 1968 (Olcina, 1994), junto con iniciales procesos de abandono y/o transformación de tierras de cultivo regadas por boqueras. El vuelo interministerial de 1977-1978 presenta una elevada escala de detalle y ya se aprecian las primeras consecuencias de la puesta en funcionamiento del embalse de Santomera (1965), previo a las grandes transformaciones agrarias derivadas del trasvase Tajo-Segura. Por último, los vuelos de 1984-1985, permiten comprobar las consecuencias de la avenida de 1987 si se comparan con fotogramas de 1988 (Catastro) y posteriores de la década de 1990, todos ellos disponibles en las Fototecas del IGN y del ICV.

Se plantea, así, la necesidad de integrar la información de una amplia variedad de fuentes de datos para realizar análisis que permitan identificar y resumir los cambios espacio-temporales en la estructura ribereña y en los procesos de flujo, en la línea de otros estudios similares realizados en ramblas del mediterráneo peninsular (Garófano-Gómez, et al. 2013). Con ello se pretende mejorar la comprensión y la gestión de los sistemas fluviales, con el objetivo de reducir su peligrosidad atendiendo a los principios de sostenibilidad y de resiliencia que contenían este tipo de sistemas de regulación. No en vano, funcionaron durante siglos y de forma característica en las cuencas vertientes del sureste de la península Ibérica, con indudables consecuencias hidrogeomorfológicas.

REFERENCIAS

- Bellot, P. (2001). *Anales de Orihuela: (siglos XIV-XVI)*. Real Academia Alfonso X el Sabio. 2 v. Edición a cargo de J. Torres Fontes.
- Box Amorós, M. (1985). Distinta valoración de los aguaceros en el tiempo: la alarma de noviembre de 1984 en Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 3, 51-62.
- Box Amorós, M. (1990). Un ejemplo tardío de riego de boquera: la presa del Madroñal (Ibi). *Investigaciones Geográficas*, 8, 51-57.
- De Gea Calatayud, M., Moñino Pérez, R., Marín Aniorte, P. y Marco Tristán, E. (2011-2012). Los regadíos medievales y su evolución histórica en el Bajo Segura. Poblamiento, poder social y comunidades campesinas. En: *Cuadernos de Historia y Patrimonio Cultural del Bajo Segura*, 4-5. Fundación de la Comunidad Valenciana "Patronato Histórico-Artístico de la ciudad de Orihuela", Orihuela (Alicante).
- Del Río Rodríguez, P. (2016). *Consecuencias y procesos geomorfológicos en el Barranco de Pepior tras la avenida del 20 de octubre de 1982*. Trabajo Final de Máster, Alicante.

- Díez Lorente, S.; Marco Molina, J.A.; Matarredona Coll, E. y Padilla Blanco, A. (2003). *Cartografía básica geomorfológica E 1:100.000. Elche (14-18; 15-18)*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante.
- Garófano-Gómez, V., Martínez-Capel, F., Bertoldi, W., Gurnell, A., Estornell, J. and Segura-Beltrán, F. (2013). Six decades of changes in the riparian corridor of a Mediterranean river: a synthetic analysis based on historical data sources. *Ecohydrology*, 6 (4), 536-553.
- Gil Olcina, A. y Canales, G. (1988). *Residuos de propiedad señorial en España*, Diputación Provincial de Alicante, Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil-Albert, Alicante.
- Hernández Hernández, M. y Morales Gil, A. (2013). Los aprovechamientos tradicionales de las aguas de turbias en los piedemontes del sureste de la Península Ibérica: estado actual en tierras alicantinas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 63, 105-123.
- Manzano Garro, T. (1987). Características morfométricas del río Chícamo: cuenca Abanilla-Fortuna (sureste de España). *Paralelo 37*, (11), 107-112.
- Marco Molina, J. A. (1993). Rocas blandas y riesgos en el sur de la Comunidad Valenciana (España). *Investigaciones Geográficas*, 11, 237-249.
- Marco Molina, J. A. (2016). Técnicas tradicionales de información geográfica (TTIG) en el análisis de las transformaciones recientes del riu Millars (Castelló, España). En: F. Vera, J. Olcina y M. Hernandez (coords.), *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la geografía: Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil*, 273-288. Instituto Interuniversitario de Geografía, Alicante.
- Marco Molina, J. A. y Box Amorós, M. (2019). El conocimiento tradicional relativo al aprovechamiento de las aguas de avenida: l'Alcavó i la Revolta. *Canelobre,* 70, 196-205.
- Marco Molina, J.A. y Morales Gil, A. (1995). Terrazas de cultivo abandonadas en el sureste peninsular: aspectos evolutivos. *Investigaciones Geográficas*, 13, 81-90.
- Marco Molina, J.A., Olcina Cantos, J., Padilla Blanco, A. y Rico Amorós, A. (1996). Abandono de terrazas de cultivo: recolonización vegetal y erosión en el sureste peninsular. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 21, 133-146.
- Melgarejo, J. (1995). *La intervención del Estado en la cuenca del Segura (1926-1986)*. Institut de Cultura Juan Gil-Albert, Generalitat Valenciana, Alicante.
- Mondéjar Sánchez, J. M. (2009). *El riego de boqueras: una técnica hidráulica para la gestión ambiental en territorios semiáridos y lucha contra la desertificación.* Tesis doctoral (inédita).
- Morales Gil, A. (1968-69). El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. *Papeles del Departamento de Geografía*, 1, 167-187.
- Morales Gil, A., Bru Ronda, C. y Box Amorós, M. (1983). Condiciones morfológicas y chubascos de fuerte intensidad horaria en la cuenca vertiente del Barranco de las Ovejas (Alicante). En: *Lluvias torrenciales e inundaciones en Alicante*, 25-72. IUG Universidad de Alicante.
- Morales Gil, A. y Box Amorós, M. (1986). El aprovechamiento del agua y los suelos en un dominio semiárido: la cuenca del barranco Blanco, Agost (Alicante). *Investigaciones Geográficas*, 4, 7-24.
- Morales Gil, A., Box Amorós, M. y Marco Molina, J.A. (1988). El aprovechamiento de las aguas de avenida: derecho consuetudinario y disposiciones legales. En: A. Gil y A. Morales (Eds.), *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*, 553-563. Reunión Científica Internacional sobre Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante-CAM.
- Morales Gil, A., Box Amorós, M. y Marco Molina, J.A. (1991). El medio físico y la presa de Román (Jumilla): un emplazamiento favorable. *Investigaciones Geográficas*, 9, 69-80.
- Morales Gil, A. y Box Amorós, M. (1995). Boqueras y azudes: el aprovechamiento exhaustivo de las aguas esporádicas en el Sureste peninsular. En: A. Alberola (Ed.), *Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas*, 31-41. Instituto de Cultura Juan Gil-Albert, Alicante.

- Moratalla, J. (2015). El vuelo Ruiz de Alda (1929-30): un excepcional documento cartográfico. De nuevo sobre Ilici. *Saguntum. Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia*, 47, 73-88.
- Morote Seguido, A. (2013). El aprovechamiento de turbias en San Vicente del Raspeig (Alicante) como ejemplo de sistema de riego tradicional y sostenible. *Investigaciones Geográficas*, 59, 147-169.
- Sánchez, F. J. y Lastra, J. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Olcina Cantos, J. (1994). *Tormentas y granizadas en tierras alicantinas.* Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante, Alicante.
- Rosselló i Verger, V.M. (1989). Los llanos de inundación. En: A. Gil y A. Morales (Dir.), *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo,* 243-283. Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante y Caja de Ahorros del Mediterráneo, Alicante.
- Vera Rebollo, J. F. y Marco Molina, J. A. (1998). Impacto de los usos del suelo y erosión en cuencas vertientes del sur del País Valencià. *Investigaciones Geográficas*, 6, 7-31.

LA RECUPERACIÓN DE COSTES Y LA FINANCIACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE DAÑOS DE INUNDACIONES

Marcos García-López
marcos.garcialopez@ua
https://orcid.org/0000-0001-7184-1809

Borja Montaño
borja.montano@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-3975-5529

Joaquín Melgarejo
jmelgar@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-9752-2854

Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales,
Universidad de Alicante, España

RESUMEN

Las inundaciones son un fenómeno natural que puede causar grandes daños, por lo que la mitigación de estos consigue gran relevancia. Además, estos daños pueden ser muy variados y existen diversos factores que inciden sobre la resistencia al impacto de este tipo de fenómenos. Los daños dependen de aspectos como la profundidad del agua, la velocidad que lleva, la duración del fenómeno o la composición del agua, entre otros, pero factores como tener en cuenta el riesgo de inundación a la hora de edificar o disponer de sistemas de alerta temprana que permitan una buena preparación son también relevantes. Como es habitual, las medidas destinadas a reducir los daños potenciales de una inundación presentan un coste económico que debe financiarse. No obstante, estas medidas no se imputan a un usuario concreto a través de una tarifa, de modo que su financiación es menos clara. Analizando los niveles de recuperación de costes de los organismos de cuenca españoles, se puede observar una falta de financiación que podría incidir sobre la ejecución de nuevas medidas de mitigación de daños, tan necesarias en determinados lugares del país.

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son fundamentales para la sociedad, no obstante, pueden surgir múltiples problemas a la hora de gestionarlos. En concreto, podemos encontrarnos con problemas como distribuciones desiguales del recurso (Prats, 2016), escasez, elevado coste del servicio derivado de esta, contaminación o con los graves daños causados por inundaciones, entre otros. De este modo, la política hídrica debe abordar cuestiones variadas con el fin de mitigar en la medida de lo posible la incidencia de todos los problemas relacionados con los recursos hídricos. En el caso de las inundaciones, se llevan a cabo medidas con el fin de evitar, o al menos reducir, el impacto económico, social y ambiental que se deriva de una inundación. Esto incluye medidas que van desde prevenir el daño a la compensación económica del daño causado (Kousky, 2018), teniendo todas ellas un lugar en la práctica debido a las variadas características de las regiones que sufren inundaciones (Zhou *et al.*, 2012). Pero, como es habitual, estas medidas disponen de un coste económico que debe abordarse, lo que condiciona la elección de la medida, (Meyer *et al.*, 2012; Haer *et al.*, 2017) y que se hace, en

este caso, a través de las confederaciones hidrográficas, las cuales, por tanto, necesitan estar bien financiadas con el objetivo de llevar a cabo des funciones con eficiencia.

El impacto causado por las inundaciones es variado, así como las características de las regiones y personas que las sufren. En general, el daño puede clasificarse en función de si es directo o indirecto, así como según si es tangible o intangible, de modo que existen 4 tipos principales de daño en función de la naturaleza de este (Merz *et al.*, 2010). En concreto, el daño puede ser directo y tangible, como el daño a edificios o infraestructuras, directo pero intangible, como pérdida de vidas o dañando los ecosistemas, indirecto y tangible, como los costes en términos de tráfico o las pérdidas de producción de empresas externas al área inundada, o indirectos e intangibles, como sería la pérdida de confianza en las autoridades o gobernantes. Los costes directos son más fáciles de cuantificar debido a que es más fácil detectarlos e intentar corregirlos, aunque inicialmente serían mucho más costosos económicamente. De todos modos, los daños también pueden clasificarse en función de su escala (Merz *et al.*, 2010), pudiendo afectar solamente a elementos de riesgo específicos, pero también podrían afectar a regiones de mayor tamaño. Además, cabe destacar que el daño causado variará según el usuario que lo sufra, pues el impacto no puede ser el mismo para un hogar privado que para una industria o un agricultor, por lo que no solo puede variar la magnitud del impacto, sino también la forma en que el daño se manifiesta.

Del mismo modo que existen diferencias en el daño sufrido por inundación según las características de las víctimas, es lógico pensar que existe una serie de factores relacionados con la vulnerabilidad a este tipo de fenómenos. Así, se pueden encontrar diversos factores que inciden sobre los daños a sufrir, comenzando por los más básicos como la profundidad de la inundación (Kreibich and Thieken, 2008), la velocidad del agua (Pistrika and Jonkman, 2009) o la duración de la inundación (Förster *et al.*, 2008). Además, la frecuencia con la que se sufre inundaciones (Elmer *et al.*, 2010) y el momento del día o la época del año (Dutta *et al.*, 2003) también condicionan el impacto, Por último, la composición del agua, en concreto la contaminación o los sedimentos presentes en esta, también son relevantes de cara a explicar la incidencia de una inundación (Kreibich and Thieken, 2008; Kato and Torii, 2002). Sin embargo, del mismo modo que existen variantes acerca del daño según la situación en que se da el fenómeno, también existen algunas cuestiones que permiten incrementar la resistencia a las inundaciones. Principalmente, estos factores están relacionados con el uso que se da a los edificios (Scawthorn *et al.*, 2006), con el tipo de edificio (Kreibich and Thieken, 2008), con el material utilizado para la construcción (Schwarz and Maiwald, 2008) o con la precaución a través de considerar la incidencia de las inundaciones en el momento de la construcción (Kreibich and Thieken, 2008). Además, disponer de un sistema de alerta temprana permite minimizar el impacto gracias a su previsión, lo que permite actuar con agilidad y decisión.

Dado que las medidas de prevención de inundaciones disponen de un coste económico, la adecuada financiación de los organismos responsables es esencial. Sin embargo, en España esta es una tarea encomendada a las confederaciones hidrográficas, de modo que analizar su situación presupuestaria y financiera es de gran interés con el objetivo de mejorar la eficiencia en estas cuestiones. Esta cuestión cobra más importancia si cabe teniendo en cuenta que se prevé un incremento de este tipo de fenómenos en el futuro (Kubal *et al.*, 2009; Johnson *et al.*, 2007), con su respectivo incremento de los daños, por lo que financiar correctamente medidas que eviten o mitiguen el impacto de las inundaciones es básico. Con el objetivo de analizar dicha situación financiera, a esta introducción le seguirá una explicación más detallada de los tipos de daño, después de los factores de vulnerabilidad y resistencia y terminará con los datos de recuperación de costes de las confederaciones hidrográficas españolas y las conclusiones.

2. TIPOS DE DAÑOS PROVOCADOS POR LAS INUNDACIONES

Como se ha comentado en la introducción, la clasificación general de los daños conlleva la distinción entre daños directos o indirectos y tangibles o intangibles (Merz *et al.*, 2010). De este modo, los daños directos y tangibles incluirían una gran cantidad de daños y serían los más fáciles de observar, incluyéndose aquí el daño a edificios, su contenido, la destrucción de infraestructuras, paralización de la actividad económica o los costes de limpieza y reparación, entre otros. Los daños directos pero intangibles estarían relacionados con daños a ecosistemas, pérdida de vidas, lesiones de las víctimas, ya sean físicas o mentales, o, incluso, daños al patrimonio cultural. Los daños indirectos son más difíciles de cuantificar, pues el impacto de una inundación en una región abierta al exterior puede incidir también sobre otros territorios con vínculos con el afectado. De nuevo, se dividen en tangibles, como la interrupción de los servicios públicos, la pérdida de producción de empresas externas a la zona afectada o costes de tráfico, pero también intangibles como traumas o pérdida de confianza en las autoridades. Por tanto, también se puede observar una distinción entre daños según el tipo de daño, destacando los daños económicos, los humanos y los ambientales.

También conviene destacar la importancia de la escala del daño, pues este se afronta y previene de manera diferente en función de si afecta a puntos concretos o, por el contrario, afecta a grandes regiones y muestra un impacto a gran escala (Merz *et al.*, 2010). De este modo, cabe la posibilidad de que el impacto afecta al crecimiento económico nacional si el impacto es elevado, afectando también a la balanza comercial, la inversión, la inflación y la deuda pública. Sin embargo, en los países avanzados este impacto se suele reducir a regiones concretas o, en todo caso, muestra un impacto a escala nacional de corto plazo, lo que condiciona la forma de reaccionar a las inundaciones.

3. ASPECTOS DE VULNERABILIDAD Y RESISTENCIA A LAS INUNDACIONES

El daño causado por las inundaciones depende, además, de las características de cada caso, pues existe una serie de factores que condicionan el impacto. En primer lugar, cuanto mayor es la profundidad de la inundación, mayores son los daños que esta puede causar, pues afecta a una cantidad más elevada de edificios, así como de su contenido (Kreibich and Thieken, 2008). La velocidad del agua es otro factor básico, pues guarda relación con la fuerza del fenómeno, de modo que una alta velocidad conllevaría una mayor fuerza del agua, afectando con más fuerza a las víctimas (Pistrika and Jonkman, 2009). La duración de la inundación guarda relación con los dos anteriores pues, aparte de la profundidad y la velocidad, una larga duración de una inundación incrementa la probabilidad de causar daños y acrecienta los esfuerzos necesarios para limpiar y reparar los daños (Förster *et al.*, 2008). Además, la frecuencia con la que se sufre inundaciones puede mostrar efectos acumulativos debido a que la recuperación no es instantánea, por lo que sufrir inundaciones continuadas puede incrementar la vulnerabilidad a las mismas (Elmer *et al.*, 2010). El momento del día o la época del año también condicionan el impacto, por ejemplo, por la noche el daño puede ser mayor debido a la mayor dificultad para transmitir la alerta y actuar de manera efectiva, mientras que en época estival los propietarios de inmuebles en regiones afectadas pueden estar ausentes, limitando la respuesta al fenómeno o, incluso, la incidencia de la inundación puede ser mayor si afecta a los agricultores en un momento crítico (Dutta *et al.*, 2003). Por último, la composición del agua también contribuye a la incidencia de una inundación, destacando el incremento del daño y del coste de limpieza provocado por una alta contaminación del agua, así como el daño que puede causar la presencia en el agua de sedimentos de variados tamaños, ya que son elementados sólidos que pueden causar grandes daños. (Kreibich and Thieken, 2008; Kato and Torii, 2002).

Sin embargo, del mismo modo que existen aspectos de vulnerabilidad, también existen algunos factores que permiten incrementar la resistencia a las inundaciones. En primer lugar, el uso que se da a los edificios es de gran importancia, destacando los edificios que contienen bienes de gran valor,

pues en caso de inundación los daños potenciales son muy elevados, justificando así su mayor grado de preparación en términos comparativos (Scawthorn *et al.*, 2006). El tipo de edificio también guarda relación con los daños potenciales en el sentido de que un edificio con mayor número de plantas solamente sufriría daños en las partes bajas, mientras que un edificio más pequeño sufriría daños en una parte relativamente mayor del edificio (Kreibich and Thieken, 2008). El material utilizado para la construcción es relevante en la medida que no todos los materiales reaccionan de la misma manera al contacto con el agua, así como con la contaminación, además de incidir en el peso del edificio, por lo que el riesgo de inundación podría influir en la decisión de qué material de construcción utilizar (Schwarz and Maiwald, 2008). Además del material, diseñar el edificio teniendo en cuenta el riesgo de inundación contribuiría a reducir los daños en el caso de que se produzcan, reduciendo también el esfuerzo necesario en la corrección del impacto. (Kreibich and Thieken, 2008). Por último, disponer de un sistema de alerta temprana que avisa con el tiempo suficiente permite llevar a cabo medidas de emergencia con agilidad y decisión, por ejemplo cerrar edificios para que el agua no entre o retirar de la zona que se verá afectada los vehículos, la maquinaria y demás bienes vulnerables.

4. OBJETIVOS, ACTUACIONES Y PRESUPUESTOS DE LAS CONFEDERACIONES HIDROGRÁFICAS

Con el objetivo de minimizar el impacto de las inundaciones, las confederaciones hidrográficas se encargan de diseñar conjuntos de medidas acorde a la situación del territorio del que se encargan. En concreto, las confederaciones disponen de un Plan General de Riesgo de Inundación que persigue un total de 8 objetivos priorizados en este orden (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015; Confederación Hidrográfica del Segura, 2015; Govern de les Illes Balears, 2015):

1. Incremento de la percepción del riesgo de inundación y de las estrategias de autoprotección en la población, los agentes sociales y económicos.
2. Contribuir a mejorar la ordenación del territorio y la gestión de la exposición en las zonas inundables.
3. Mejorar la capacidad predictiva ante situaciones de avenida e inundaciones.
4. Mejorar el conocimiento para la adecuada gestión del riesgo de inundación.
5. Mejorar la coordinación administrativa entre todos los actores involucrados en la gestión del riesgo.
6. Mejorar la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad de los elementos ubicados en las zonas inundables.
7. Conseguir una reducción del riesgo a través de la disminución de la peligrosidad.
8. Contribuir a la mejora o al mantenimiento del buen estado de las masas de agua a través de la mejora de sus condiciones hidromorfológicas.

Con el fin de cumplir con estos objetivos, el Plan General de Riesgo de Inundación dispone de varios tipos de medida. En primer lugar, el tipo de medida más importante en términos de presupuesto son las medidas preventivas, con las que se persigue evitar la materialización del daño potencial. En segundo lugar, existen medidas de protección destinadas a reducir los daños en caso de que se materialice el riesgo. En tercer lugar, las medidas de preparación consisten en tener en funcionamiento los sistemas de previsión y alerta, así como los planes de actuación en caso de emergencia y la concienciación de la población. Por último, las medidas de recuperación y evaluación conllevan la reparación o compensación de los daños causados, además del aprendizaje derivado de la emergencia sufrida. Por otra parte, estas medidas requieren de financiación, la cual puede provenir de fuentes diversas. La partida presupuestaria principal de estos planes corresponde a la propia confederación, no obstante, determinadas medidas están financiadas por el gobierno nacional o por el gobierno autonómico de la zona afectada. La Tabla 1 muestra las partidas presupuestarias por tipo de medida, sin distinguir por organismo financiador, permitiendo observar que en la cuenca del

Segura o en las Islas Baleares las medidas de prevención son claramente mayores en términos presupuestarios respecto al resto.

	Segura		Júcar		Baleares	
Tipo de medida	Presupuesto (M€)	Porcentaje (%)	Presupuesto (M€)	Porcentaje (%)	Presupuesto (M€)	Porcentaje (%)
Prevención	28,75	52	23,1	31	4,240	78,25
Protección	13,32	24	25,6	34	0,778	14,37
Preparación	13,22	24	13,8	19	0,400	7,38
Recuperación	-	-	12	16	-	-
Total	55,29	100	74,5	100	5,418	100

Tabla 1. Presupuestos por tipo de medida para las confederaciones del Segura, del Júcar y de las Islas Baleares. Fuente: Planes hidrológicos de las cuencas hidrográficas del Segura, del Júcar y de las Islas Baleares.

Además, debe tenerse en cuenta que la previsión es de aumento del número de inundaciones, así como de sus daños (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020; Navarro, 2018; Johnson *et al.*, 2007; Dawson *et al.*, 2011), por lo que cabría esperar un incremento futuro de medidas dentro del Plan de Gestión de Riesgo de Inundación. En concreto, los recientes sucesos en distintas zonas de la cuenca hidrográfica del Segura han manifestado la necesidad de seguir avanzando en materia de mitigación de los efectos principales de las inundaciones, como muestra el esquema del Plan de Gestión de Riesgo de Inundación para el ciclo hidrológico 2021-2027. Por tanto, la correcta financiación no sólo de las confederaciones hidrográficas, sino de los gobiernos autonómico y nacional, es de gran relevancia con el objetivo de disponer de los recursos adecuados para elaborar las medidas necesarias que permitan minimizar el impacto de las inundaciones. Por este motivo, y dado que el papel de las confederaciones en este ámbito es esencial, analizar su situación presupuestaria sería conveniente para mejorar la capacidad del Plan de Gestión de Riesgo de Inundación.

5. FINANCIACIÓN DE LAS CONFEDERACIONES HIDROGRÁFICAS

Con el objetivo de analizar la situación presupuestaria de los organismos de cuenca, la Tabla 2 presenta los resultados de recuperación de costes de estas entidades, tanto financieros como totales, para el ciclo hidrológico actual (2015-2021) y para el próximo (2021-2027).

Recuperación de costes	% Costes financieros		% Costes totales	
Confederación Hidrográfica	2015-2021	2021-2027[1]	2015-2021	2021-2027[1]
Cantábrico Occidental	85	86	76	77
Cantábrico Oriental	74	79	67	74
Ceuta	69	68	56	66
Duero	64	82	49	49
Ebro	76	83	65	70
Galicia Costa	49	-[2]	41	-[2]
Guadalquivir	83	84	74	79
Guadiana	80	71	59	50
Islas Baleares	75	-[2]	58	-[2]
Júcar	84	93	78	87
Melilla	41	37	40	37
Miño-Sil	38	49	34	47
Segura	83	82	57	63
Tajo	91	88	81	73
Tinto, Odiel y Piedras	89	90	74	76

[1]En algunos casos, en los documentos bajo consulta pública para las planificaciones del próximo ciclo hidrológico (2021-2027) los datos de recuperación de costes del ciclo actual han variado levemente, pero se ha optado por mantener el dato de la memoria del plan hidrológico de cuenca vigente, pues en estos nuevos documentos solamente se ofrecen los datos de recuperación de costes totales de los planes actuales, dejando fuera la distinción entre costes financieros y ambientales.
[2]Baleares y Galicia Costa todavía no tienen un documento para el nuevo ciclo.

Tabla 2. Recuperación de costes, totales y financieros, de las Confederaciones Hidrográficas españolas para los ciclos hidrológicos 2015-2021 y 2021-2027. Fuente: García-López, Montaño y Melgarejo (2019) y elaboración propia.

A simple vista se puede observar cómo en el ciclo actual ningún plan hidrológico muestra una completa recuperación de los costes financieros. Teniendo en cuenta los costes ambientales, la recuperación de costes disminuye, como es razonable, lo que deja una importante necesidad de financiación adicional proveniente de los propios ingresos de los servicios del agua. Este hecho se da para ambos ciclos hidrológicos, como es lógico, aunque los niveles de recuperación de costes varían según la demarcación y el ciclo hidrológico. En este sentido, se pueden observar tanto mejoras como deterioros del nivel de recuperación de costes mostrado por los organismos de cuenca, aunque en todo caso no se completan ni la recuperación de los costes financieros ni, por supuesto, la de los totales.

Estos datos muestran que la situación de estos organismos es ajustada en términos presupuestarios, lo que podría limitar la ejecución de medidas adicionales. Como explica la Confederación Hidrográfica del Segura (2015): *hay un coste ambiental pendiente (futuro) y otro ya internalizado, correspondiente a las medidas ya ejecutadas y que se incluyen en los costes financieros*. Así, esta misma confederación reconoce que dispone de una serie de medidas, ya planificadas, que no está siendo posible llevar a la práctica. Esto podría suponer un problema a la hora de desarrollar nuevas medidas con el objetivo de mitigar el impacto de las inundaciones, que han afectado con fuerza a varias regiones de la demarcación del Segura. En otras demarcaciones la situación presupuestaria es ajustada del mismo modo que en esta, aunque el riesgo de inundación, así como sus daños potenciales, varía de manera significativa según la región, por lo que este problema no se manifestará con la misma magnitud en todas las demarcaciones.

No obstante, cabe destacar que la mayor parte del coste de las medidas del plan de inundaciones no es directamente imputable a los usuarios de los servicios del agua, por lo que son medidas que no disponen de una financiación específica dentro de la confederación, no se les calcula recuperación de costes y no se puede proponer, por ejemplo, un incremento de la tarifa para cubrir los costes. Por este motivo, y con el objetivo de exponer de manera más clara la incidencia de la falta de financiación de estos organismos, la Tabla 3 muestra la inversión prevista para 2021 por parte de la Confederación Hidrográfica del Segura, así como el volumen ejecutado al finalizar 2017 y el grado de avance que esto supone. La tabla muestra 5 categorías y en todas ellas se observa una importante falta de inversión en comparación con la prevista, pero destaca el hecho de que solamente se han invertido 0,86 millones de euros de los 107,67 previstos con el fin de combatir los fenómenos extremos, lo que supone un 0,8 % de dicha previsión. Por supuesto, todavía quedaría por computar la inversión durante el resto del periodo, el cual todavía no ha finalizado, pero los datos manifiestan los problemas de financiación que sufre esta institución.

Objetivos de la medida	Previsto para 2021		Ejecutado final 2017		Grado de avance (%)	
	Nº medidas	Inversión	Nº medidas	Inversión	Nº medidas	Inversión
Objetivos ambientales	360	522,61	40	72,33	11,1	13,8
Satisfacción de demandas	65	148,10	1	14,39	1,5	9,7
Fenómenos extremos	73	107,67	1	0,86	1,4	0,8
Gobernanza y conocimiento	161	73,08	2	2,42	1,2	3,3
Otros usos asociados al agua	16	59,02	0	1,27	**0**	**2,2**
Totales	**675**	**910,49**	**44**	**91,27**	**6,5**	**10,0**

Tabla 3. Grado de ejecución del Programa de Medidas 2015/21 para la Confederación Hidrográfica del Segura. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, 2020.

Por último, la Figura 1 muestra el avance en los programas de medidas de las distintas confederaciones, permitiendo así observar la situación del resto de organismos de cuenca. Por desgracia, los datos muestran que el programa de medidas del Segura no es el único que se ve ralentizado por la falta de inversión, sino que es la tónica general, mostrando Melilla el menor índice de avance y las Islas Baleares el más elevado. En concreto, el índice de avance se mueve entre el 1,6 % de Melilla y el 27,5 % de las Baleares, quedando pendiente gran parte de la inversión en todos los casos. De nuevo, esto solamente refleja una parte del periodo en el que se debía ejecutar la inversión, pero deja patente que no es problema de un objetivo concreto, como combatir los fenómenos extremos, o de una demarcación concreta, como la del Segura, sino que la falta de financiación o de inversión es la situación general.

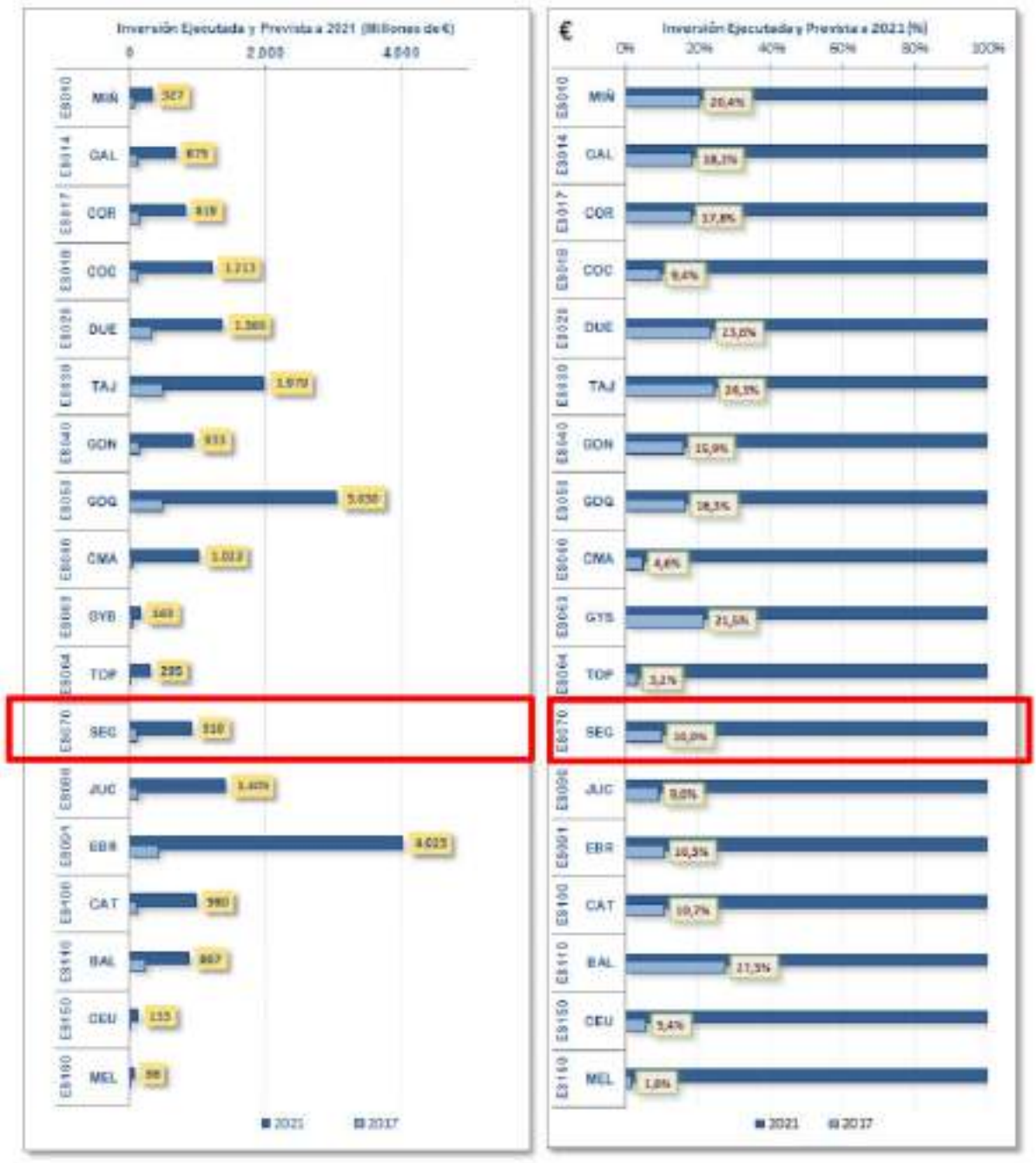


Figura 1. Avance en los Programas de Medidas: inversión ejecutada y prevista a 2021. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, 2020.

Por tanto, los índices de recuperación de costes, así como la inversión en los programas de medidas, muestran que los ingresos propios de estos organismos no son suficiente para cubrir los costes de los servicios del agua imputables al usuario de dicho servicio, de modo que estos ingresos no permiten, o al menos limitan significativamente, abordar nuevas inversiones en materia de gestión de inundaciones. Sin embargo, como indica el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) en su Borrador del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030, se están buscando nuevas fuentes de financiación. En concreto, se buscan fondos adicionales a través de instrumentos europeos que se marcan el objetivo de dirigir la economía europea hacia la sostenibilidad, así como mediante la financiación nacional con el desarrollo de la financiación pública y de nuevos incentivos a la movilización de fondos privados.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha mostrado la variedad de factores que condicionan los daños en caso de inundación, lo que muestra la necesidad de llevar a cabo medidas de distintos tipos adaptadas a la situación. Así, aspectos como considerar el riesgo de inundación a la hora de construir, como disponer de sistemas de alerta temprana que permitan actuar con agilidad y decisión o la concienciación de las víctimas potenciales pueden ser de gran utilidad a la hora de mitigar el impacto de una inundación.

Las medidas destinadas a reducir los daños de estos fenómenos, ya sean de prevención, protección o preparación, presentan un coste financiero que debe asumirse, lo que permite evitar un impacto mayor que los recursos invertidos. Los casos recientes de inundación en varios lugares de España han puesto de manifiesto la necesidad de mejorar la gestión de las inundaciones a través de nuevas medidas. No obstante, la situación financiera de los organismos de cuenca, principal financiador de este tipo de medidas, es ajustada y el desarrollo de nuevas medidas puede ser complicado sin financiación adicional. Esta cuestión pone de manifiesto los problemas que los organismos españoles encargados de la gestión de los recursos hídricos sufren día a día, de modo que introducir mejoras en este aspecto sería de gran utilidad.

Por último, teniendo en cuenta el amplio catálogo de posibles medidas con el objetivo de mitigar los daños de las inundaciones, es lógico que exista un elevado número de entidades encargadas de financiarlas. De este modo, además de los organismos de cuenca, entidades autonómicas, nacionales y europeas contribuyen a la financiación de este tipo de medidas, por lo que sería interesante profundizar en la situación de la financiación de la gestión del riesgo de inundación.

REFERENCIAS

- Confederación Hidrográfica de Galicia-Costa (2015). *Memoria. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa*. https://augasdegalicia.xunta.gal/seccion tema/c/Planificacion_hidroloxica?content=plan-hidroloxico-gc/seccion.html&sub=Subseccion_002/
- Confederación Hidrográfica del Júcar (2015). *Memoria. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/PHC-2015-2021-Plan-Hidrologico-cuenca.aspx
- Confederación Hidrográfica del Segura (2015). *Memoria. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2015-2021*. https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/planificacion15-21/
- Confederación Hidrográfica del Segura (2020). *Esquema provisional de Temas Importantes. Tercer ciclo de planificación hidrológica de la Demarcación Hidrográfica del Segura*. https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/planificacion21-27/proceso.html
- Dawson, R. J., Ball, T., Werritty, J., Werritty, A., Hall, J. W. & Roche, N. (2011). Assessing the effectiveness of non-structural flood management measures in the Thames Estuary under conditions of socio-economic and environmental change. *Global Environmental Change*, 21(2), 628-646.
- Elmer, F., Thieken, A. H., Pech, I. & Kreibich, H. (2010). Influence of flood frequency on residential building losses. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 10, 2145-2159.
- Förster, S., Kuhlmann, B., Lindenschmidt, K. E. & Bronstert, A. (2008). *Assessing flood risk for a rural detention area*.
- García-López, M., Montano, B. & Melgarejo, J. (2019). Internalization analysis of environmental costs of wastewater treatment in the Valencian Community, Spain. *Water Resources Management X*, 229, 57.
- Govern de les Illes Balears, (2015). *Memoria. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Illes Balears 2015-2021*. https://www.caib.es/sites/aigua/es/plan_hidrolagico_de_las_illes_balears/

- Haer, T., Botzen, W. W., Zavala-Hidalgo, J., Cusell, C. & Ward, P. J. (2017). Economic evaluation of climate risk adaptation strategies: Cost-benefit analysis of flood protection in Tabasco, Mexico. *Atmósfera*, 30(2), 101-120.
- Johnson, C., Penning-Rowsell, E. & Tapsell, S. (2007). Aspiration and reality: flood policy, economic damages and the appraisal process. *Area*, 39(2), 214-223.
- Junta de Andalucía (2015). *Memoria. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras*. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=5fa1df1837fa1510VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnextchannel=bccd4ae7a9aa1510VgnVCM2000000624e50aRCRD#apartado2fa1df1837fa1510VgnVCM2000000624e50a
- Junta de Andalucía, (2019). *Memoria: Revisión de tercer ciclo. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras*. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=65faa0194aba6610VgnVCM100000341de50aRCRD&vgnextchannel=2f5f64ce1daa6610VgnVCM100000341de50aRCRD
- Kato, F. & Torii, K. I. (2002). Damages to general properties due to a storm surge in Japan. In *Solutions to Coastal Disasters*, 02, 159-171.
- Kousky, C. (2018). Financing flood losses: A discussion of the national flood insurance program. *Risk Management and Insurance Review*, 21(1), 11-32.
- Kreibich, H. & Thieken, A. H. (2008). Assessment of damage caused by high groundwater inundation. *Water Resources Research*, 44(9).
- Kubal, C., Haase, D., Meyer, V. & Scheuer, S. (2009). Integrated urban flood risk assessment-adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 9(6).
- McMullen, L. E. & Lytle, D. A. (2012). Quantifying invertebrate resistance to floods: A global-scale meta-analysis. *Ecological Applications*, 22(8), 2164-2175.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. & Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage: Review article. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 10, 1697-1724.
- Meyer, V., Priest, S. & Kuhlicke, C. (2012). Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Natural Hazards*, 62(2), 301-324.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020). Borrador del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/PNACC.aspx
- Navarro, T. (2018). Water reuse and desalination in Spain – Challenges and opportunities. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(2), 153-168.
- Pistrika, A. K. & Jonkman, S. N. (2009). Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Natural Hazards*, 54(2), 413-434.
- Prats, D. (2016). La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas. *Agua y territorio*, 8, 10-21.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., ... & Lawrence, M. (2006). HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II. Damage and loss assessment. *Natural Hazards Review*, 7(2), 72-81.
- Schwarz, J. & Maiwald, H. (2008). Damage and loss prediction model based on the vulnerability of building types. In: *RIMAX Contributions at the 4th International Symposium on Flood Defence (ISFD4)*. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Zhou, Q., Mikkelsen, P. S., Halsnæs, K. & Arnbjerg-Nielsen, K. (2012). Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. *Journal of Hydrology*, 414, 539-549.

SISTEMA DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS Y ELEMENTOS FLOTANTES PROCEDENTES DE ALIVIOS DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO EN LA CIUDAD DE ALICANTE

Luis Gabino Cutillas Lozano
Responsable de Operaciones de Redes de Saneamiento, AMAEM (España)
lgabino.cutillas@aguasdealicante.es

Miguel Rodriguez Mateos
Gerente de Operaciones, AMAEM (España)
miguel.rodriguez@aguasdealicante.es

RESUMEN

Se presenta en esta comunicación un sistema innovador de captación de elementos sólidos en aliviaderos de redes de alcantarillado unitarias, implantado en la ciudad de Alicante por la empresa Aguas Municipalizadas de Alicante, E.M. (en adelante AMAEM), consistente en un sistema de anclaje robusto al que se acoplan una serie de mallas de retención en forma de red de pesca que permiten la captura de elementos sólidos y flotantes transportados por el flujo, minimizando la pérdida de carga en la conducción. Así mismo, el diseño modular del sistema favorece su operación y mantenimiento, permitiendo la ágil limpieza de las redes de retención y su reutilización tras cada evento representativo de uso. Se describe la implantación del sistema en el canal de encauzamiento del barranco de Sangueta, al objeto de reducir el impacto ambiental que los alivios de la red unitaria de alcantarillado tienen sobre su desembocadura en momentos de lluvia. El sistema se encuentra en funcionamiento desde el mes de junio de 2019, comenzando a funcionar durante las intensas precipitaciones registradas en la ciudad durante el mes de agosto de 2019. Adicionalmente, se presentan los resultados del primer proyecto de análisis de los materiales sólidos interceptados por el sistema, llevado a cabo tras la ocurrencia del temporal Gloria en el mes de enero de 2020, con la colaboración de la Universidad de Alicante, permitiendo caracterizar los residuos generados y movilizados en tiempo de lluvia en la cuenca urbana aferente a la estación de bombeo de aguas residuales (EBAR) de El Plá.

1. ANTECEDENTES

El desarrollo urbano de la ciudad de Alicante presenta diversas peculiaridades físicas que condicionan notoriamente la configuración de su sistema de saneamiento. Entre ellas puede destacarse la influencia del asentamiento primigenio de la ciudad moderna en la bahía de Alicante, produciéndose su posterior desarrollo y expansión de forma radial desde las cotas más bajas próximas al mar hacia las más elevadas del interior. Este crecimiento radial supuso que los nuevos desarrollos drenaran sobre los preexistentes, con el consiguiente efecto acumulativo de caudales superficiales en las zonas bajas, dado que los sistemas drenantes inicialmente diseñados no podían asumir los nuevos caudales. Por otro lado, los relieves orográficos que se integran en el entramado urbano, tales como la Serra Grossa o Sierra de San Julián, el Monte Benacantil y el Monte Tossal, suponen una barrera natural para la salida de las aguas superficiales o canalizadas hacia el mar (su desagüe natural), concentrándose entonces los caudales hacia las zonas de paso ocupadas en su totalidad por el casco urbano, tales como la Rambla de Méndez Núñez, el Barranco de la Sangueta (Goteta o Bonhivern) o

el Barranco de San Blas - San Agustín. Por último, resulta también destacable, sobre todo en el desarrollo del último siglo, la existencia de un medio receptor natural de las aguas muy sensible en todo el perfil costero de la ciudad, fuertemente condicionado por la presencia del Puerto de Alicante y la Playa del Postiguet en el núcleo urbano del centro de la ciudad, o El Cabo de las Huertas y la Paya de San Juan en el norte, que limitan la adopción de soluciones para el drenaje urbano y obligan a mantener el buen estado ecológico del mismo.

El barranco de la Sangueta se ubica en el extremo suroccidental del relieve montañoso costero que constituye la Serra Grossa de Alicante y la separa del otro gran relieve costero de la ciudad, la Sierra del Benacantil. Este barranco, a día de hoy completamente integrado en la trama urbana de la ciudad, recoge una cuenca urbana de 468 ha (comprendiendo, entro otros, los barrios de El Plá, Carolinas, Gran Vía, Garbinet y Juan XXIII), además de la vertiente norte de la Serra Grossa, encontrándose canalizado (como consecuencia de las obras antirriadas ejecutadas por Consellería en el año 2000) en su tramo final mediante dos cajones, a cielo abierto en parte y soterrados con posterioridad, de dimensiones 4750 mm x 2750 mm cada uno y teniendo su desembocadura en la zona denominada del Cocó.

Las aguas residuales (de tiempo seco) y unitarias (en momentos de lluvia) generadas en la anterior cuenca son gestionadas, hasta el límite de su capacidad, por las estaciones de bombeo de aguas residuales (EBAR) de El Plá y Cocó. Estas estaciones de bombeo disponen de mecanismos de emergencia que permiten que los caudales de aguas residuales (en caso de averías en las instalaciones en tiempo seco) y/o pluviales (en caso de lluvias de escasa intensidad), que no pueden ser gestionados por las mismas, sean derivadas a través de un emisario submarino, sin provocarse alivio en la línea de costa.

Sin embargo, en casos de lluvia de mayor intensidad, ambas instalaciones poseen aliviaderos de emergencia que derivan las aguas excedentes hacia el barranco de la Sangueta, evitando con ello la presencia de inundaciones en el medio urbano y provocando, en este caso, el alivio en la desembocadura del citado barranco de las aguas unitarias, lo que perjudica el estado ecológico del medio marino y de la cala del Cocó, al aliviarse grandes cantidades de elementos sólidos flotantes de origen antrópico (toallitas, plásticos, etc.) procedentes de los citados aliviaderos y que discurrían por la red de alcantarillado.



Figura 1. Perspectiva, del punto de alivio del Barranco de Sangueta sobre la cala del Cocó y restos flotantes (elementos de higiene íntima y toallitas) observados tras un evento de lluvia intensa en las aguas costeras del entorno. Fuente: AMAEM.

Al objeto de dar solución a la problemática de los arrastres de elementos sólidos procedentes de las redes de alcantarillado en momentos de alivio del barranco de Sangueta hacia el mar, se diseña un sistema de intercepción de los caudales unitarios en el seno del barranco y almacenamiento de los elementos sólidos transportados para su posterior retirada y gestión una vez finalizado el evento de alivio, evitando con ello que lleguen al medio marino y mejorando el estado ecológico de la cala del Cocó.

Respecto al marco normativo vigente, la solución da respuesta a uno de los requerimientos del RD 1290/2012, que expresa en su artículo 259 ter., punto d), que:

> *Los aliviaderos del sistema colector de saneamiento y los de entrada a la depuradora deberán dotarse de los elementos, pertinentes en función de su ubicación, antigüedad y el tamaño del área drenada para reducir la evacuación al medio receptor de, al menos, sólidos gruesos y flotantes. Estos elementos no deben reducir la capacidad hidráulica de desagüe de los aliviaderos, tanto en su funcionamiento habitual como en caso de fallo*.

Existe una variedad de soluciones para la retención de sólidos en sistemas de drenaje, típicamente basadas en rejillas. En comparación con otras, la solución propuesta tiene una capacidad de retención mucho mayor y un mantenimiento (limpieza) más sencillo, minimizando a la vez la pérdida de capacidad de evacuación de la infraestructura sobre la que se coloca. El sistema propuesto proporciona una solución eficiente y de bajo coste (tanto en términos de implementación como de mantenimiento) para intentar dar respuesta a la problemática resumida con anterioridad.

2. ENFOQUE TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN PLANTEADA

La solución propuesta se basa en el empleo de mallas de retención de sólidos elaboradas con redes de polietileno instaladas, mediante un sistema de baja resistencia al flujo, en los dos canales que encauzan el barranco de Sangueta. El diseño de estas redes está optimizado para su posterior mantenimiento, limpieza y reutilización, pudiendo separarse completamente de su sistema de anclaje transversal al flujo para su limpieza y vaciarse siguiendo el principio de las redes de pesca.

2.1. Bases del diseño de la solución

Durante el año 2018 ocurrieron un total de 34 eventos de precipitación en los que se produjo el funcionamiento del barranco de Sangueta, así como el alivio de la EBAR de El Plá hacia el mismo. Los calados registrados en el barranco fueron variables (según los datos proporcionados por un medidor de nivel instalado en el mismo), desde 3 centímetros hasta 99 centímetros, lo que conlleva una alta variabilidad de caudales trasegados por el barranco en función de la intensidad de la precipitación registrada en la gran cuenca urbana de aporte.

El sistema de captación de elementos sólidos diseñado debe ser capaz de adaptarse a estas variaciones de caudal de manera efectiva, sin suponer un obstáculo apreciable en la circulación del flujo que discurre por el canal. En este sentido, la diferenciación de la propuesta radica en el caudal a tratar, que puede llegar hasta los 10 a 12 m^3/s en cada canal. Por ello, se ha buscado una solución que no minore la capacidad de transporte de agua pluvial de los canales.

2.2. Diseño de la solución adoptada

El sistema de retención de sólidos diseñado utiliza, por un lado, un sistema de anclaje mediante ganchos montados sobre estructura de acero, que minimiza el coste de ejecución y, dado que ha de disponerse de forma ortogonal a la dirección del flujo, minimiza a su vez la pérdida de carga que supondría la presencia de un obstáculo continuo en el canal (tipo mureta).



Figura 2. Vista general y croquis de diseño del sistema de anclaje mediante viga transversal empotrada y sistema de acoplamiento de mallas de retención de sólidos mediante ganchos de acero. Fuente: AMAEM.

Por otro lado, el elemento de retención, como se ha indicado con anterioridad, lo constituyen unas bolsas de malla de polietileno con maroma de cierre en la boca y las características que se recogen a continuación:

- Bolsa para residuos de red tejida con nudo inglés de polietileno verde de 5 milímetros y malla al rombo de aproximadamente 4 centímetros.
- Medida de boca cuadrada 0,60m x 0,60m y 2 metros de largo.
- Parte posterior de la bolsa cerrada y cosida.
- Parte delantera y boca de la bolsa perimetrada con un cabo de poliéster de alta tenacidad de 14 milímetros de diámetro para cierre y sujeción de la boca y para cierre e izado de las mallas.
- Cabo de 14 milímetros de diámetro de poliéster de alta tenacidad por cada arista hasta la parte posterior de la bolsa, para aguantar la tensión y el posterior izado para mantenimiento.



Figura 3. Tipología de malla de polietileno empleada para dar solución a las bolsas de captación de sólidos, con las características anteriormente indicadas. Fuente: AMAEM.

Estas bolsas de malla son ejecutadas de igual forma que las redes de pesca, por lo que se ha contado empresas locales de elaboración de redes para su ejecución, favoreciendo el empleo de soluciones de confección tradicionales. En la actualidad se disponen dos niveles de retención de sólidos en cada uno de los canales del Barranco de Sangueta, disponiéndose de un total de 30 mallas de retención repartidas entre los 4 niveles de anclaje.

2.3. Mantenimiento y operación del sistema

Tras cada lluvia en la que se producen alivios del sistema de alcantarillado unitario sobre el canal de Sangueta y la acumulación de sólidos en las redes de captación lo hacen necesario, resulta preciso realizar las labores de retirada y limpieza de las redes para la restitución de la capacidad de retención de las mismas. Este proceso se realiza con ayuda de un camión grúa que permite izar cada una de las redes del sistema y transportarlas hasta la Estación Depuradora para su limpieza.



Figura 4. Vista general de la solución de captación implementada en el canal de Sangueta (Alicante), tras una lluvia. Fuente: AMAEM.

El proceso de mantenimiento se resume en las siguientes actuaciones:

- ✓ Limpieza parcial de sólidos previa a la retirada de las redes
- ✓ Izado de mallas mediante grúa y carga en contenedor
- ✓ Vaciado de mallas en rampa de sólidos de EDAR
- ✓ Limpieza completa de mallas mediante empleo de agua a presión
- ✓ Reposición de las redes en su emplazamiento



Figura 5. Procesos de limpieza previa del canal, izado, vaciado y limpieza de mallas antes de reposición. Fuente: AMAEM.

3. CASO DE ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS EN EL SISTEMA DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS TRAS EL TEMPORAL GLORIA

Entre los días 20 y 21 del mes de enero de 2020 la ciudad de Alicante, como el resto del levante español, sufrió las consecuencias de la borrasca Gloria, materializadas en fuertes vientos, temporal marítimo y precipitaciones moderadas. Hablando de estas últimas, la ciudad de Alicante recogió, según los datos proporcionados por los pluviómetros que AMAEM tiene distribuidos por la ciudad, en torno a 50 l/m^2 de precipitación acumulada a lo largo del episodio en la zona norte de la ciudad (cuenca aferente al barranco de Sangueta), con intensidades máximas puntuales que alcanzaron los 55 l/m^2/h.

Esta precipitación provocó el funcionamiento de las infraestructuras de alivio de la red unitaria de alcantarillado de la ciudad que, en el caso del barranco de Sangueta, provocaron la entrada en funcionamiento de las redes de captación de sólidos instaladas en el encauzamiento de éste.

3.1. Cálculo de los caudales en el canal de Sangueta

Para poder calcular los caudales registrados durante el temporal Gloria en el encauzamiento del barranco de Sangueta, han sido necesarios los datos contenidos en la base de datos temporal obtenida a partir del medidor de nivel (limnímetro) instalado en uno de los dos cajones del encauzamiento, aguas abajo del sistema de captación de sólidos, durante los días 20 y 21 de enero de 2020. Con el dato de calado registrado de forma continua (cada 30 segundos) durante la duración del episodio de precipitaciones y conociendo la sección transversal de los canales y la pendiente longitudinal de los mismos, aplicamos la ecuación de Manning para la determinación del caudal medio registrado en cada uno de los eventos de precipitación relacionados con el temporal, así como el caudal máximo de ellos:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S}$$

Siendo:
- Q, el caudal en m^3/s
- n, el parámetro de rugosidad del material de revestimiento del canal
- S, pendiente en tanto por uno del canal (m/m)
- R_h, el radio hidráulico (m)
- A, el área de la sección del flujo de agua en el canal (dependiente del calado, y)

De esta forma, durante los días 20 y 21 de enero de 2020 se registraron 4 eventos de alivio independientes en el barranco de Sangueta. Los calados medios y máximos registrados en cada uno de estos eventos se recogen en la tabla siguiente:

Fecha del alivio	Hora de inicio	Hora de fin	Calado medio (m)	Calado máximo (m)
20/01/2020	08:09:00	12:23:00	0,25	0,57
20/01/2020	19:10:00	20:26:00	0,21	0,39
20/01/2020	21:39:00	22:53:00	0,26	0,42
21/01/2020	05:08:00	06:10:00	0,25	0,43

Tabla 1. Ocurrencia de alivios y determinación de calados medios y máximos registrados en el canal de Sangueta en el evento de precipitación motivado por el temporal Gloria los días 20 y 21 de enero de 2020. Fuente: elaboración propia.

Como se observa, los calados medios y máximos registrados en los 4 eventos de precipitación son muy similares entre sí, lo que da una idea de la uniformidad de la intensidad de precipitación, de la duración de la lluvia en cada una de ellas, así como del tiempo de concentración en la cuenca y de crecida en el canal.

Tras el análisis de calados medios y máximo durante el temporal, adoptaremos el valor de calado medio igual a promedio de los calados medios registrados y_{med} = 0,24 metros y el valor de calado máximo como el máximo de ellos $y_{máx}$ = 0,57 metros.

Como consecuencia de ello, los valores de caudal medio (Q_{med}) y caudal máximo ($Q_{máx}$) registrados en el evento de precipitación ligado al temporal Gloria son:

- Q_{med} = 14,7 m^3/s en cada uno de los dos canales (suponiendo un reparto equitativo del caudal)
- $Q_{máx}$ = 57,6 m^3/s en cada uno de los dos canales (suponiendo un reparto equitativo del caudal)

3.2. Cálculo de la dilución entre las aguas residuales y pluviales en el alivio de la EBAR de El Plá sobre el barranco de Sangueta

Un concepto importante para determinar el buen funcionamiento operativo de una infraestructura de alivio es el coeficiente de dilución entre las aguas residuales y pluviales asociado al mismo. Para el cálculo de la dilución en el aliviadero hay que tener en cuenta el caudal de aguas residuales en tiempo seco y relacionarlo con el caudal generado por las aguas de lluvia antes de su alivio al medio receptor. Para ello, aplicamos la ecuación:

$$C_d = \frac{Q_r}{Q_r + Q_{ll}}$$

Siendo:

- C_d el coeficiente de dilución
- Q_r, el caudal de las aguas residuales (m^3/s)
- Q_{ll}, el caudal de las lluvias (m^3/s)

El valor del caudal de aguas residuales se obtiene a través del análisis del funcionamiento de la EBAR de El Plá, punto en el que convergen todas las aguas residuales de la cuenca, y que se encuentra telemandada, recibiéndose los datos necesarios para dicho análisis a través de un sistema SCADA. Conocida la superficie en planta de la cántara de almacenamiento de la EBAR y el nivel que separa las consignas de arranque y paro de la misma, así como el tiempo comprendido entre el paro y el arranque de bomba, podemos determinar una aproximación válida del caudal de aguas residuales que entra en la estación.

Analizando estos valores en los días de tiempo seco previos y posteriores a la ocurrencia del temporal Gloria, obtenemos valores de caudal de tiempo seco muy similares entre sí, con un valor promedio de Q_r = 0,15 m^3/s.

Por su parte, como caudal de lluvias se adoptarán los valores de caudal medio (Q_{med}) y caudal máximo ($Q_{máx}$) obtenidos en el apartado anterior, obteniéndose entonces unos coeficientes de dilución asociados al evento de precipitaciones analizado de:

- C_{dmed} = 0,0050 = 1/200
- $C_{dmáx}$ = 0,0013 = 1/750

Esto es, el caudal medio aliviado por el Barranco de Sangueta posee una parte de agua residual en 200 de agua pluvial, muy por debajo de la proporción 1/5 que se suele utilizar para dimensionar el buen funcionamiento de un aliviadero.

Conocidos los valores de caudal máximo y medio y dilución máxima y media de los alivios registrados durante la lluvia registrada en la duración del temporal Gloria en Alicante, los podremos relacionar con la cantidad y tipología de elementos sólidos capturados por las redes de retención dispuestas en el canal, tal y como se expresa a continuación.

3.3. Análisis de los sólidos recogidos en las redes

A lo largo de los meses de febrero y marzo de 2020 Aguas Municipalizadas de Alicante (AMAEM), junto con la Universidad de Alicante (UA), realizaron un proyecto colaborativo al objeto de caracterizar y desarrollar una metodología de análisis de los elementos sólidos capturados por el sistema de redes de retención del barranco de Sangueta. Para ello, tras las lluvias ocasionadas por el temporal Gloria, se almacenó en 2 contenedores de 2 m^3 de capacidad el contenido de 4 de las mallas (dos pertenecientes a uno de los canales y dos pertenecientes al otro) del sistema de captación para su posterior análisis. Durante el proyecto se procedió a realizar labores de cribado del material almacenado y clasificación en función de la tipología de material (plásticos, fibras, orgánicos, etc.). Con ello, se consiguió aportar información relevante acerca de los materiales que desde los sistemas de alcantarillado unitario pueden llegar a aportarse a los medios naturales receptores.

3.3.1. Resultados de la macro y micro clasificación de los sólidos capturados por el sistema de redes

La macro clasificación de materiales sólidos capturados por el sistema de retención instalados en los canales se basa en las siguientes categorías (fundamentadas en los elementos esperables procedentes de la red de alcantarillado):

- Materia orgánica y vegetal (MO)
- Cartón y papel (CyP)
- Textil (T)
- Plástico y fibras no textiles (P)

Tras el temporal Gloria, tal y como se ha expresado con anterioridad, en el sistema de redes instalado en el canal de La Sangueta se extrajo y almacenó en contenedores el material sólido captado por 4 de las redes de retención instaladas. El pesaje de este material, en estado húmedo, ascendió hasta los 180,74 kg de residuos sólidos, entre los que predominaba el contenido en materia orgánica y vegetal (124,38 kg) y los plásticos y fibras no textiles (55,18 kg), que constituyen el 99 % de los materiales captados. El 1 % restante son restos de papel, cartón y material textil (prácticamente insignificantes, sobre todo por la rápida degradación de los materiales como el papel y el cartón en contacto con el agua).

Cabe destacar que, extrapolando los valores del pesaje de las 4 redes analizadas, la cantidad de residuos sólidos captados en las redes como consecuencia del temporal Gloria ascendieron a las 1,4 toneladas, que quedaron retenidas y fueron pertinentemente tratadas en Estación Depuradora, evitando su vertido al mar.

Adicionalmente, se comprueba que existe una mayor propensión al almacenamiento de materiales sólidos en uno de los dos canales del encauzamiento del barranco, debido a la configuración estructural del mismo, que genera una fuerte curva y posee una gran incorporación lateral a unos 160 metros aguas arriba del sistema de captación.

Una vez realizada la macro clasificación de materiales, se realizó una nueva micro clasificación centrada los materiales predominantes (plásticos y fibras no textiles). La subcategorización se clasificó según los elementos encontrados en:

- Botellas
- Materiales de higiene personal (toallitas y compresas, bastoncillos, etc.)
- Aluminio
- Fragmentos plásticos



Figura 6. Cribado manual de los residuos almacenados en las redes de retención y clasificación en función de sus características. Fuente: AMAEM.

En esta nueva clasificación destacan claramente los elementos provenientes de uso higiénico personal (toallitas y compresas) frente al resto, acumulándose 46,35 kg en ambos canales, lo que representa un 84 % de los plásticos recolectados. El resto de los materiales plásticos encontrados (16 %) son fundamentalmente botellas de plástico y aluminio, así como pequeños fragmentos de plástico probablemente arrastrados al interior de los colectores a través de la escorrentía superficial que circula por las calles de la ciudad.

3.4. Futuras investigaciones

Desgraciadamente desde el mes de enero de 2020, por motivo del estado de alarma en el que nos hemos visto inmersos, solo se ha podido realizar el estudio de materiales contenidos en las redes de retención explicado en el presente apartado. Siguiendo la metodología descrita, se pretende continuar con el análisis exhaustivo de los materiales capturados en las mallas de retención de sólidos con la finalidad de caracterizar de forma ajustada la relación existente entre el peso (húmedo y seco) y la tipología (textiles, plásticos, material vegetal, materia orgánica, etc.) de los materiales capturados procedentes de la cuenca urbana aferente a la EBAR de El Plá y las condiciones de contorno atmosféricas que generan los alivios hacia el canal de Sangueta, tales como intensidad de precipitación y transformación de lluvia en escorrentía y caudales registrados en la conducción. La relación entre cantidad de sólidos aportados por el aliviadero de la EBAR de El Plá y la dilución de los caudales residuales en momentos de lluvia que acaban siendo aliviados por el canal de Sangueta será importante para dar respuesta a los requerimientos legales derivados de la aplicación de RD 1290 de 2012 y, previsiblemente, de las todavía inéditas Normas Técnicas que lo desarrollan.

4. CONCLUSIONES

El sistema de retención de sólidos presentado en esta comunicación tiene como finalidad última, y consigue, la mejora ecológica en el entorno de la cala del Cocó de Alicante, mediante el diseño de un sistema innovador de captación de elementos gruesos y flotantes procedentes del alivio del sistema de alcantarillado unitario al medio marino, en momentos de lluvia, a través del Barranco de Sangueta.

La estructura diseñada es reutilizable, desmontable y escalable, permitiendo así adaptar en un futuro las soluciones de mitigación de vertidos procedentes de las redes de alcantarillado a otras ubicaciones,

optimizando con ello su diseño y maximizando sus beneficios medioambientales.

Desde la puesta en funcionamiento del sistema de captación de elementos sólidos basado en redes de retención se ha podido comprobar la gran cantidad de elementos contaminantes sólidos que se movilizan en las redes de alcantarillado en momentos de lluvia intensa y que pueden ser aliviados a los medios receptores. En el caso de los eventos de alivio registrados como consecuencia del temporal Gloria se retuvieron más de 1 Tonelada, pero en eventos de precipitación puntuales y muy intensos como los que suele sufrir la ciudad de Alicante tras largos períodos sin lluvias, como los que suelen acontecer después del verano, esta cantidad puede ser muy superior. Esto fue lo que ocurrió la primera vez que entraron en funcionamiento en septiembre de 2019 cuando se acumularon hasta 100 l/m^2 de precipitación en 6 horas con una intensidad máxima de 130 $l/m^2/h$ y se recogieron hasta 20 toneladas (peso mojado) de residuos en las redes.

Los resultados de los análisis de los materiales captados indican que, con diferencia, el mayor aporte de residuos generados en cuencas urbanas tiene su origen en el mal uso ciudadano de los elementos sanitarios particulares (WC), donde siguen desechándose elementos de higiene personal no degradables como las toallitas húmedas, compresas, bastoncillos de limpieza, etc. que circulan permanentemente por las redes de alcantarillado y que, en momentos de lluvia, pueden ser aliviados a los medios receptores.

REFERENCIAS

- Aguas Municipalizadas de Alicante, Empresa Mixta, AMAEM (2003). *Plan Director de alcantarillado de Alicante*.
- Amores, J. y Martín, E. (2008). *Ramblas, barrancos e inundaciones*. Alicante Vivo. http://www.alicantevivo.org/2008/06/ramblas-barrancos-e-inundaciones.html
- Balairón, L., et al. (2007). *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano*. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, CEDEX, Sección de Edición.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012). *Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas*. https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2012-11779
- Vasile, E. (2020). *Sistema de retención de sólidos instalado en el encauzamiento del barranco de Sangueta*. Documento de prácticas en la empresa Aguas Municipalizadas de Alicante, Empresa Mixta.

SOLUCIONES A LAS INUNDACIONES DE LA CALA DE FINESTRAT

Miguel Angel Pérez Pascual
Jefe de Operaciones Alicante Norte, HIDRAQUA (España)
mperez@hidraqua.es

Pablo Alemany Sánchez
Jefe de Obras, HIDRAQUA (España)
pablo.alemany@hidraqua.es

RESUMEN

Durante las últimas décadas, la paulatina ejecución de las previsiones urbanísticas contempladas en los PGOU de Finestrat, Villajoyosa y Benidorm, han venido acercando el suelo urbano consolidado hacia los bordes del barranco de la Cala de Finestrat. A pesar de haberse ido ejecutando diversos tramos de encauzamiento del barranco de La Cala y de alguna torrentera afluente en sus tramos medios y bajo, los 250 m finales del trazado del barranco hasta su desembocadura en la playa de "La Cala de Finestrat", se encuentran totalmente ocupados por la trama urbana consolidada desde hace muchos años, lo que representaba un problema sin resolver que se manifestaba con especial dureza durante los episodios de fuertes precipitaciones, puesto que las abundantes escorrentías acumuladas terminaban discurriendo por la vía pública, afectando gravemente a las propiedades públicas y privadas que alcanzaba a su paso, llegando incluso a ocasionar la pérdida de vidas humanas en los años 2011 y 2016. Las obras ejecutadas para la canalización del barranco en su tramo medio-bajo han conseguido hasta la fecha encauzar grandes avenidas que, por el contrario, de no haberse ejecutado, habría derivado en la misma problemática de años anteriores.

1. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA EXISTENTE

La consolidación urbana que ha sufrido el barranco alrededor de sus márgenes a lo largo de los años ha supuesto una modificación de las condiciones naturales y físicas del mismo. Además, con el fin de transformar el lecho terroso del cauce en otro tipo de superficies aprovechables y accesibles para el público en general, donde se pudieran realizar instalaciones provisionales, al tiempo que se pudieran mantener superficies limpias sin invasión de vegetación y sin arrastre de tierras, se procedió al asfaltado paulatino del cauce hasta llegar a la situación en la que se cubre totalmente toda la superficie porosa y permeable del encauzamiento original, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Figura 1. Fotografías aéreas del barranco de La Cala en los años 2002, 2007 y 2011 (de izquierda a derecha). Fuente: Google Earth.

Las sucesivas ampliaciones del área asfaltada en los 750 m finales del tramo encauzado terminaron ocupando el 100 % de la explanada destinada a lecho del cauce, que se encontraba confinada entre las canalizaciones laterales para aguas bajas, dándole aspecto y funcionalidad plenamente urbanas, y en consecuencia acogiendo usos urbanos (estacionamiento de vehículos, mercadillo semanal, paseo urbano, etc.).

Desde el desafortunado suceso de octubre de 2011, en el que un fenómeno tormentoso provocó una avenida que anegó el mercadillo provisional allí instalado ocasionando la pérdida humana de dos turistas, este tramo del encauzamiento se ha mantenido cerrado para cualquier otro uso distinto al tránsito peatonal, o servicios de mantenimiento y limpieza del cauce.

Por otro lado, en los 250 m finales hasta su desembocadura en el mar, el barranco pierde la fisonomía de cauce para enlazar con la trama plenamente urbana del viario.



Figura 2. Vista aérea del tramo antropizado del barranco de La Cala de Finestrat. Fuente: Google Earth.



Figura 3. Tramo medio (izquierda) y alto (derecha) del encauzamiento del barranco de La Cala de Finestrat. Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Control de acceso al cauce (izquierda) y tramo inicial en Avenida Marina Baja (derecha). Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Tramo urbano del barranco de La Cala en Avenida Marina Baja. Fuente: Google Earth.

Tras el análisis de la situación por parte de los organismos oficiales competentes, se concluye que la principal problemática radica en la elevada velocidad de circulación de ciertos caudales de referencia, lo que aumenta la peligrosidad del encauzamiento por el riesgo de arrastre de personas y bienes, lo cual se viene achacando directamente a la reducida rugosidad del lecho del cauce por las sucesivas operaciones de pavimentado.

En consecuencia, la estrategia pactada ente el Ayuntamiento de Finestrat y la CHJ es el intentar revertir el estado actual del cauce hacia situaciones anteriores, donde la irregularidad del cauce natural ofrecía una mayor resistencia al paso a las avenidas, ralentizando su velocidad y reduciendo su peligrosidad.



Figura 6. Tramo medio del barranco La Cala durante un episodio de lluvia torrencial. Fuente: Google.



Figura 7. Vista aérea del tramo bajo del barranco La Cala durante un episodio de lluvia torrencial. Fuente: https://sisepuedefinestrat.wordpress.com/2016/05/02/la-tragedia-del-barranco-de-la-cala-de-finestrat/



Figura 8. Desembocadura del barranco La Cala en Avenida Marina Baja durante un episodio de lluvia torrencial. Fuente: https://lamarinaplaza.com/2015/09/07/avance-la-lluvia-provoca-inundaciones-en-benidorm-y-finestrat/

2. SOLUCIÓN PROPUESTA

Las actuaciones propuestas y aprobadas por los organismos de cuenca y costas se dividen en tres fases claramente diferenciadas y que se exponen a continuación.

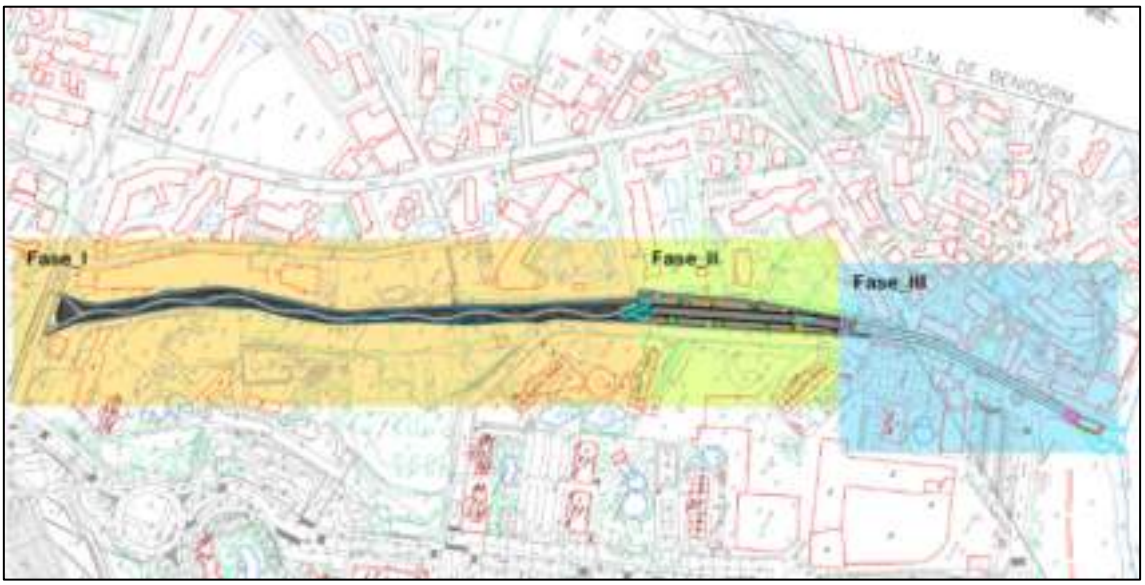


Figura 9. Fases de ejecución para el acondicionamiento del Barranco de La Cala de Finestrat. Fuente: García Pastor, 2017a.

2.1. Fase I.

Se centra en el tramo de 520 m del barranco comprendido entre la Obra de Paso bajo la antigua travesía urbana de la carretera N-332 y unos 250 m antes de la avenida de la Marina Baixa (lugar en que el barranco se pierde entre zona urbana consolidada).

El objetivo de esta fase se centra en la obtención del incremento de rugosidad prevista en el cauce, mediante la demolición, arranque y sustitución de la mayor parte del lecho pavimentado con aglomerado asfáltico, y su cambio por una superficie de escollera con piezas de entre 912 kg (d90) y 310 kg (d30) agrupada en islas laterales y semienterradas en el terreno natural del lecho. Dichas islas de escollera están situadas fuera de las cunetas de hormigón (las cuales se mantienen), y flanquean una vía de servicio central para el mantenimiento, de 3 m de anchura, que discurre de forma sinusoidal y que permanecerá provisionalmente con pavimento de aglomerado actualmente extendido. En una actuación posterior se podría contemplar la sustitución del pavimento original del camino de servicio que se conserve, por otro pavimento asfáltico tipo poroso o drenante.

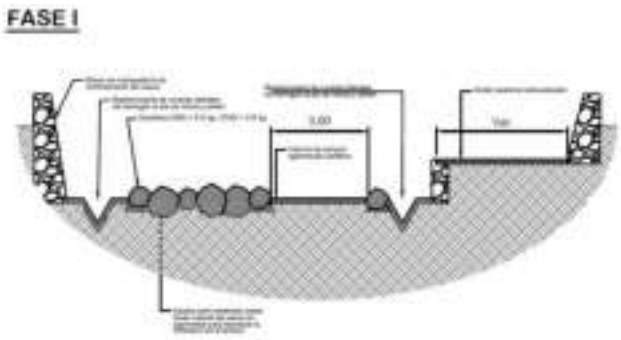


Figura 10. Sección transversal Fase I. Fuente: García Pastor, 2017a.

El trazado sinusoidal de la vía de servicio central evita la formación de canales centrales de desagüe rápido, porque de esta forma se obliga a todo el flujo de avenida, a discurrir sobre las mantas de escollera en algún momento de su avance hacia “aguas abajo”.

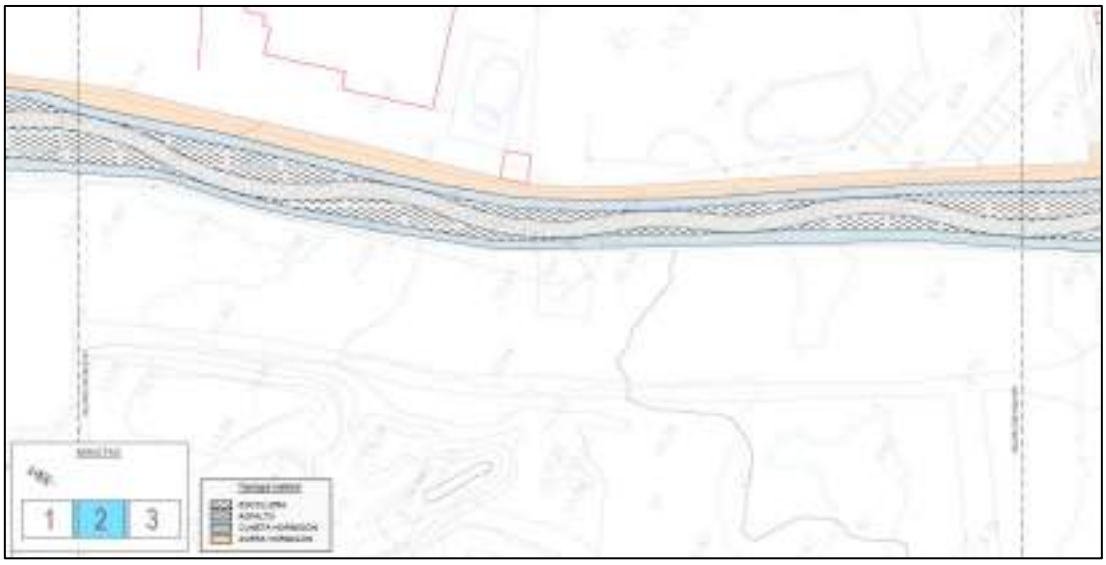


Figura 11. Planta del trazado del camino sinusoidal. Fuente: García Pastor, 2017a.



Figura 12. Ejecución de la Fase I, tramo medio del barranco de La Cala. Fuente: elaboración propia.

2.2. Fase II.

La fase II conecta con el encauzamiento ejecutado aguas arriba (Fase I) y está formado por un canal abierto de 160 m de longitud con lecho de escollera y márgenes de gaviones cuya función es la recogida, concentración y direccionamiento del flujo principal de la avenida para que discurra por el tramo final del encauzamiento.



Figura 13. Transición encauzamiento de mayor anchura (Fase I) con encauzamiento en canal abierto de menor anchura (Fase II). Fuente: García Pastor, 2017b.



Figura 14. Labores de ejecución del lecho de escollera y márgenes de gaviones en Fase II. Fuente: elaboración propia.

2.3. Fase III.

La solución propuesta en esta fase representa un sistema sifonado, donde un tramo de la canalización entra en carga dado que los puntos de entrada "aguas arriba" y salida "aguas abajo" del tramo en conducto cerrado, se encuentran a una cota ligeramente superior a la clave de dicha canalización en su tramo central.

Este sistema está compuesto por 3 elementos:

1. Una ***arqueta de captación***, a situar unos 70 m antes de la finalización del actual encauzamiento sobre el vial urbano "avenida Marina Baixa". Su función es facilitar la transición de caudales desde el canal abierto (Fase II) en superficie hasta un tramo de canalización cerrada. Dicha captación dispone de capacidad para derivar caudales correspondientes a un periodo de retorno de 100 años.



Figura 15. Transición encauzamiento en canal abierto (Fase II) con encauzamiento subterráneo (Fase III). Fuente: García Pastor, 2017b.



Figura 16. Arqueta de captación ejecutada en Fase III. Fuente: elaboración propia.

2. Un tramo de canalización subterránea de 200 m de longitud para el transporte de las aguas pluviales en el tramo final del barranco de La Cala de Finestrat hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo.

Esta canalización se compone por un doble marco con 2 celdas de 3.50x1.50 m, situado a poca profundidad bajo la rasante del tramo final del barranco antes del cruce con la avenida Marina Baja y bajo la calzada de la citada avenida después.



Figura 17. Colocación de marcos en Avenida Marina Baja. Fuente: elaboración propia.

El objetivo de dicha canalización es desviar por debajo de la actual superficie del viario urbano plenamente consolidado de La Cala de Finestrat, la totalidad de los caudales pluviales que discurran por el cauce, desde la primera gota hasta un caudal máximo de 28.2 m3/sg correspondiente a un periodo de retorno de 100 años según el criterio impuesto por la CHJ.

3. **Un arquetón de laminación** y vertido directo sobre la playa mediante desborde fronto-lateral de los caudales conducidos hasta ella a través del marco bicelular. El aumento del nivel de lámina de agua recibida en este arquetón final permite desaguar sobre el nivel actual de la playa.

   Como se ha mencionado, el funcionamiento del tramo de canalización subterránea, desde la arqueta de captación hasta la arqueta de vertido, funciona como un sistema sifonado, de tal forma que una vez alcanzado el punto bajo del arquetón de vertido, y dado que el labio vertedero del arquetón se encuentra 2.40 m por encima del fondo, el agua pluvial irá acumulándose en el interior de arquetón (y del marco bicelular) de modo similar al funcionamiento de un tanque de tormenta e incrementando el calado. Únicamente cuando el calado acumulado por la avenida sobrepase la cota umbral del labio vertedero, sólo entonces se producirá el vertido directo sobre la playa.

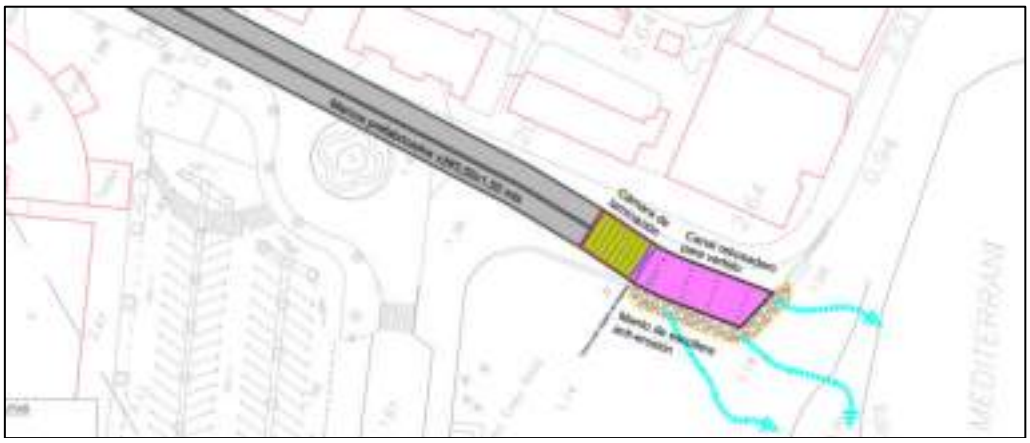


Figura 18. Esquema de funcionamiento del arquetón de alivio. Fuente: García Pastor, 2017b.

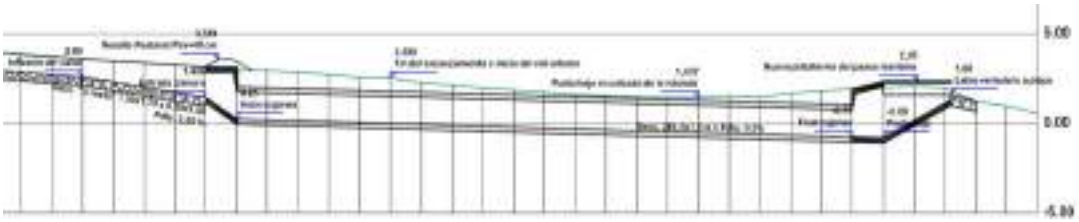


Figura 19. Esquema del perfil longitudinal del sistema. Fuente: García Pastor, 2017b.

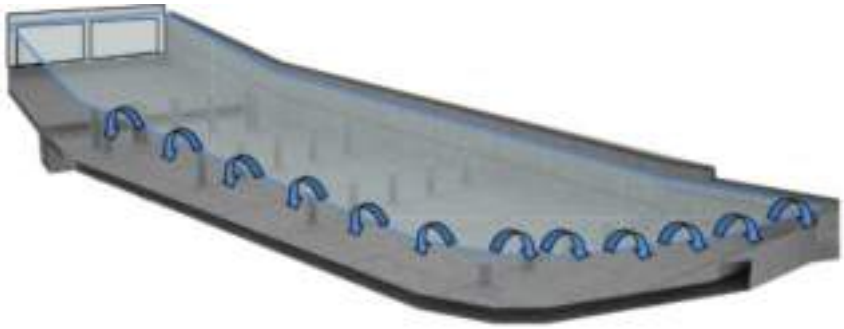


Figura 20. Arqueta de vertido con rebosadero frontal y lateral hacia La Cala de Finestrat. Fuente: García Pastor, 2017b.

Una vez finalizada la aportación de escorrentías en cabecera de la instalación, se interrumpirá el flujo sobre el labio vertedero que descarga sobre la playa. En ese momento, en el interior de los 200 m del marco bicelular y en el interior del arquetón de vertido quedarán unos 2000 m3 de agua de lluvia acumulados. Una vez sedimentados, se procede de forma progresiva a su descarga por medio de un sistema de bombeo, ya sea evacuándolo a la red de saneamiento municipal para su depuración en el sistema de saneamiento comarcal o, en caso de detectar presencia de entrada de agua marina y en consecuencia presentar un nivel elevado de conductividad, se alivia directamente al mar.



Figura 21. Ejecución de arquetón de vertido y fin de canalización subterránea con marcos. Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADO DE LA ACTUACIÓN DURANTE EPISODIOS DE LLUVIA TORRENCIAL

Una vez ejecutadas las obras, se ha podido comprobar la eficacia de la infraestructura con lluvias de carácter torrencial. Las fotografías que a continuación se muestran corresponden al funcionamiento debido a las lluvias del pasado 14 de agosto de 2019 en el que se acumularon un total de 45,4 mm en 45 minutos, alcanzando un pico de intensidad máxima de 198,6 mm/h.



Figura 22. Direccionamiento del flujo hacia el canal abierto, transición Fase I-Fase II. Fuente: elaboración propia.



Figura 23. Funcionamiento de la arqueta captación, inicio del encauzamiento subterráneo del barranco de La Cala. Fuente: Diario Información.



Figura 24. Funcionamiento del labio de vertido fronto-lateral del arqueton de alivio en la playa de La Cala. Fuente: elaboración propia.



Figura 25. Funcionamiento del labio de vertido fronto-lateral del arquetón de alivio en la playa de La Cala. Fuente: elaboración propia.



Figura 26. Situación del labio de vertido tras el episodio de lluvia torrencial. Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- García Pastor, Jose Ramón (2017a). *Proyecto de Acondicionamiento del lecho del Barranco La Cala de Finestrat, Fase I.*
- García Pastor, Jose Ramón (2017b). *Proyecto de Canalización del Barranco La Cala de Finestrat, Fase II y III.*

BLOQUE III

Evaluación socioeconómica, ambiental y jurídica.



Excmo. Ayuntamiento de Orihuela

DIPUTACIÓN DE ALICANTE CICLO HÍDRICO

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

IUACA
INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

PLANIFICACIÓN SECTORIAL Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES: AVANCES EN LA ESTRATEGIA DE INTEGRACIÓN TÉCNICO-JURÍDICA

Asensio Navarro Ortega
Departamento de Derecho administrativo, Universidad de Granada, España
asenavort@ugr.es

RESUMEN

El trabajo analiza los avances que se han producido en la estrategia de integración técnico-jurídica en materia de inundaciones como un proceso social, todavía, en construcción. La primera etapa, ya consolidada, ha estado caracterizada por la transposición del marco normativo y experimental de la Directiva de inundaciones a España y la elaboración de complejas cartografías de riesgos. El carácter perimetral de estos mapas, pero, también, sus procesos de información por capas y su decantación técnica, ha sido completado de forma exitosa. En aras de conseguir sus objetivos, el trabajo, se centra, en primer lugar, en examinar la compleja elaboración de estos mapas de riesgos y las dificultades metodológicas que acompañan a su función informadora, teniendo en cuenta la transversalidad que existe en torno a las zonas inundables. En segundo lugar, el trabajo analiza las relaciones sectoriales y los instrumentos para gestionar, de manera coordinada, el riesgo de inundación; y cómo se debe procurar, poco a poco, un proceso de integración entre las diferentes administraciones y regulaciones técnicas. Puesto que la ordenación del territorio sigue siendo la política sectorial más determinante, realizaremos un análisis más detallado al respecto señalando algunos cambios que, sin duda, se deberán acometer en los próximos años. En este sentido, la revisión de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación, que se ha hecho coincidir con el tercer ciclo de revisión de los planes hidrológicos de demarcación, junto con la aprobación del RD 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se introduce una regulación detallada de los usos del suelo y las construcciones en zonas inundables, son dos buenos puntos de partida. Finalmente, reflexionamos sobre el concepto de "umbral de riesgo tolerable", tal y como se vislumbra en la regulación sectorial, por el cual se permitiría un uso "responsable" y "controlado" en las zonas de riesgo; y en la necesidad de acotar la proliferación de conceptos técnicos en torno a las "zonas inundables", partiendo del hecho de que, como realidades geográficas por determinar, estas zonas están sujetas a cálculos que admiten diferentes interpretaciones y metodologías.

1. BALANCE INSTITUCIONAL DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN LA UNIÓN EUROPEA

Los episodios hidrológicos extremos son cada vez más frecuentes y devastadores en Europa. Según el Registro de daños del *NatCatService* (Múnich Re., 2014), los daños por inundaciones aumentarán en las próximas décadas desde los 7.000 millones de euros anuales (período de estimación 1981-2010), a 20.000 millones de euros anuales (década de 2020), 46.000 millones de euros anuales (década de 2050) y, hasta 98.000 millones de euros anuales (década de 2080). Para paliar esta cruda realidad, la Unión Europea viene desarrollando una ímproba labor normativa e institucional durante las últimas décadas, dirigida a combatir los daños provocados por las inundaciones.

El informe Especial del Tribunal de Cuentas Europeo "Special European Court of Auditors *report número 25/2018: Floods Directive: progress in assessing risks, while planning and implementation*

need to improve" (2018), reconoce el avance que se ha producido en el conjunto de la Unión Europea en lo relacionado con la evaluación y gestión de riesgos por inundaciones. No obstante, concluye que es necesario mejorar la planificación y la ejecución de las políticas públicas en esta materia con el fin de garantizar la protección de las personas y los entornos más vulnerables. Según este informe, el coste económico que acarrean las inundaciones en el conjunto de la Unión Europea ascendió a 166.000 millones de euros entre 1980 y 2017, un tercio del total de las pérdidas provocadas por fenómenos relacionados con el cambio climático: tormentas, heladas, olas de calor, sequías e incendios forestales, etc.

El órgano europeo remata su auditoría con un paquete de recomendaciones a los Estados miembros, de acuerdo a los avances y deficiencias constatados desde la aprobación de la Directiva de 2007/60, de 23 de octubre, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (en adelante, Directiva de inundaciones), que podemos agrupar, resumidamente, en los siguientes bloques:

En primer lugar, se debe avanzar en los objetivos de índole económica, financiera, de seguros y reaseguros: es preciso aumentar la rendición de cuentas en relación a la gestión del riesgo de inundaciones. Asimismo, se debe mejorar la identificación de los recursos financieros en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) y priorizar el uso de fondos económicos dirigidos a la prevención de inundaciones. Igualmente, se debe concienciar a la sociedad sobre la ventaja que tiene la contratación de seguros privados con el fin de aumentar la cobertura social frente a las inundaciones.

En segundo lugar, se debe fortalecer el cumplimiento normativo de las Directivas 2000/60/CE, de 23 de octubre, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DMA) y de inundaciones, así como desarrollar mecanismos de seguimiento para evaluar y calibrar la puesta en práctica de los Planes de Gestión del Riesgo de inundación en relación a las normas de ordenación territorial y urbanística.

En tercer lugar, a nivel ingenieril, se recomienda una mayor generación de medidas verdes encaminadas a reducir el riesgo de inundación, actuando en combinación con las infraestructuras grises tradicionales (medidas estructurales) cuando sea necesario. De la misma manera, se deben priorizar nuevas actuaciones y medidas de contención para mitigar el cambio climático en relación a la gestión del riesgo de inundaciones.

A pesar de realizar una valoración positiva del balance institucional, la política comunitaria se enfrenta, en materia de inundaciones, a la necesidad de superar lagunas de conocimiento, integrando los procesos de gestión de la ciencia y la política para la reducción del riesgo de desastres, destacando, a este respecto, la existencia de vacíos epistemológicos, institucionales y estratégicos (Lauta et al., 2017).

2. MARCO DESCRIPTIVO DE LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA

En España, las inundaciones constituyen el riesgo natural de mayor significancia en número de vidas e impacto económico. La producción de fenómenos hidrológicos extremos conlleva pérdidas humanas, degradación del ambiente, pérdidas del patrimonio cultural y de la actividad económica, etc., por lo que constituyen un grave problema social.

Las inundaciones en nuestro país tienen una especial relevancia debido a la peligrosidad natural y a la intensa ocupación del territorio, especialmente en las zonas costeras y en las áreas próximas a la desembocadura de los ríos, así como en las riberas de los ríos. Estas inundaciones se ven condicionadas por un marco físico y biótico singular y diverso (climas, sustratos geológicos,

regímenes pluviales, vegetación, paisajes, suelos, etc.) en el que se coexisten entornos hidrológicos cambiantes: fuertes gradientes de aridez, islas de humedad en contextos secos, variabilidad de las escorrentías, regímenes potenciales de avenidas por la acusada pendiente del terreno y la torrencialidad de las lluvias, las producción de fenómenos de precipitaciones repentinas, etc.).

Las inundaciones repentinas o súbitas, con una duración corta o muy corta, son muy frecuentes en ciertas zonas de España. En los últimos años se han registrado más del doble de inundaciones repentinas que alcanzan una magnitud media o grave comparativamente con las que se produjeron a finales de la década de 1980. Según el Consorcio de Compensación de Seguros (2014) y el Instituto Geológico y Minero de España, las inundaciones cuestan una media estimada anual de 800 millones de euros anuales. Además de ser especialmente catastróficas, resultan complejas de predecir, pues tienen un alcance local que depende de las características del terreno: topografía, viento, etc. El cambio de los patrones de precipitaciones y del clima, así como la subida del nivel del mar, hacen que estas inundaciones sean también impredecibles. De hecho, en España, el índice de vulnerabilidad por riesgos de inundación (el cual se calcula dividiendo el número medio de víctimas mortales por año, entre el número medio de personas expuestas por millón de habitantes) es de 9,44 puntos, lo que representa un valor sensiblemente superior al del conjunto de Europa, con un índice de 3,31 puntos (BERGA, 2011).

La protección frente a las inundaciones depende de sectores de ordenación muy variados, por lo que es necesario avanzar en la estrategia de integración normativa y en el desarrollo de políticas públicas coordinadas. El agua, la protección civil y de emergencias, así como la ordenación del territorio y el urbanismo son, entre otros, decisivos. Pero se trata de una realidad compleja, por lo que, cada vez más, es preciso atender a la experiencia y al conocimiento agregado de otras ciencias, así como al sentido común y a la racionalidad económica.

Los mapas de peligrosidad elaborados en España han identificado más de 1.300 zonas de alto riesgo de inundación. Más de 700.000 personas viven en la zona de alta probabilidad de inundación (Diario El País, 2015). Según fuentes oficiales (MITECO, 2019), 710.666 habitantes viven en zonas inundables con período de retorno de 10 años; 1.951.129 habitantes, en zonas con período de retorno de 100 años; y más de 2.835.524 de personas habitan en zonas con un período de retorno de 500 años.

Siguiendo a Díez-Herrero & García (2016) , frente a los daños que producen las inundaciones caben, en primer lugar, estrategias centradas en los aspectos predictivos o preventivos, que tienen principalmente en cuenta actuaciones vinculadas a la planificación y a la realización de decisiones estratégicas, pero, también, otras basadas en la predicción de las inundaciones (predicción meteorológica e hidrológica), a través de redes de instrumentales, el uso de tecnologías de satélites y la utilización de modelos específicos o sistemas automáticos de información. En segundo lugar, destacan las medidas preventivas, que se componen de medidas estructurales (infraestructuras y gestión hidrológico-agroforestal) y no estructurales (ordenación del territorio, sistemas de seguros, educación con respecto al riesgo o planificación en materia de protección civil). Y, en tercer lugar, encontramos medidas correctoras que sirven para mitigar las situaciones de riesgo o decidir cómo actuar una vez el evento se ha producido y que, básicamente, consisten en la utilización de actuaciones de emergencia y en la restauración y reconstrucción de los daños producidos (indemnizaciones, incentivos fiscales, declaración de zonas catastróficas…).

Como veremos, una de las particularidades de este esquema de actuaciones se traduce en que, cada vez más, el Derecho actúa, no solamente, en un plano preventivo, mediante la aprobación de cartografías específicas; sino, también, en un plano corrector, a través de actuaciones reparadoras (como las que plantea el RD 638/2016, de 9 de diciembre, sobre los usos y construcciones prohibidos y permitidos bajo determinadas condiciones en las zonas inundables de los cauces del dominio

público hidráulico, al que más tarde nos referiremos) que regulan los usos del suelo en zonas inundables con cambios relevantes en la distribución y aceptación del riesgo; o, incluso, en diferente plano, conforme a la aprobación de guías técnicas que introducen medidas de normalización (ya sean técnicas, mediante interpretaciones consensuadas; o, administrativas, a través de autorizaciones condicionadas), basadas en soluciones ingenieriles y obras capaces de amortiguar los efectos devastadores de las inundaciones a la vez que controlan la exposición y peligrosidad de zonas, en muchos casos habitadas, en las que se localiza un riesgo cierto de inundación.

La prevención de riesgos naturales, como veremos, está ligada a la capacidad técnica de reflejar y anticipar (prevenir) situaciones destructivas (cartografía de riesgos). Pero las medidas de mitigación también precisan de mapas y cartografía de zonas inundables. Estos instrumentos admiten metodologías y análisis de representación que llegan a ser muy distintos: históricos, hidrológicos-hidráulicos, geomorfológicos, paleohidrológicos, encuestas, matrices para la evaluación cualitativa de riesgos, etc. Esta incertidumbre técnica, con frecuencia, se traspasa al ámbito jurídico, que debe establecer un enfoque holístico, interdisciplinar, integrativo y ecosistémico, atendiendo a principios de gestión recogidos en la legislación, como son los de adaptación normativa y a las condiciones del medio, de mitigación de daños, de precaución, de durabilidad, de resiliencia y de responsabilidad. Y, que, sobre todo, no lo olvidemos, impone resultados en la vida de las personas: como paralizar un proceso urbanizador, demoler un edificio o acreditar la seguridad de las personas que habitan ese espacio.

3. LA PREVENCIÓN ESTRATÉGICA DEL RIESGO DE INUNDACIONES: UN PROCESO EN CONSTRUCCIÓN

3.1. El perfil técnico de la Directiva de inundaciones

Con la aprobación de la Directiva de 2007/60, de 23 de octubre, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, se produce un hito en la prevención, protección y mitigación del riesgo de inundaciones. La contribución de la norma ha sido contundente y positiva, marcada por el desarrollo de un conocimiento técnico que ha permitido acreditar suficiencia y legitimidad decisoria a los instrumentos regulatorios y de planificación. Los avances en la estrategia de integración sectorial también han sido notables. La Directiva de inundaciones, ha contribuido a desarrollar instrumentos coordinados, como son los Planes de Gestión de Riesgo de inundación que, no solo realizan un tratamiento sistemático del fenómeno en sí, sino que, también, se relacionan coherentemente con otras regulaciones sectoriales (aguas, ordenación del territorio, protección civil, etc.) permitiendo una integración con otras normas de cabecera, como es la Directiva marco del agua.

Desde esta perspectiva, la Directiva de inundaciones tiene como objetivo la generación de un conocimiento reforzado para la evaluación de los riesgos de inundaciones, así como el logro de una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y de la sociedad implicadas en la gestión de eventos hidrológicos extremos. Para la consecución de este objetivo, la Directiva plantea la obligación de completar una serie de tareas que, progresivamente, se han ido desarrollando en los Estados miembros.

3.2. Principales hitos de la Directiva de inundaciones: un proceso evolutivo todavía en progresión

La Directiva de inundaciones obliga a desarrollar un conjunto de actuaciones de ámbito técnico que se han ido perfeccionando durante años.

En primer lugar, la Directiva obligó a realizar una evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) y a identificar las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI). En esta primera etapa se determinaron las zonas para las cuáles existía un riesgo potencial de inundación

"significativo" sobre la base del estudio de informaciones disponibles sobre inundaciones históricas, estudios de zonas inundables, impactos predecibles del cambio climático, planes de protección civil, ocupación del suelo, así como del conjunto de infraestructuras operativas que existían (medidas estructurales) para hacer frente a las inundaciones. La elaboración de estos estudios se realizó en coordinación con las autoridades de protección civil, previo informe de la Comisión Nacional de Protección Civil, para las demarcaciones intercomunitarias; así como por parte del órgano equivalente en las cuencas intracomunitarias. Conforme al conocimiento técnico "recopilado" en estos estudios, se establecieron baremos de peligrosidad y exposición que permitiesen valorar e identificar los daños, y establecer los umbrales de riesgo "significativo", con el fin de identificar y consignar, finalmente, en un instrumento operativo estas áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI).

En una segunda etapa, se elaboró, para cada ARPSI, introduciendo capas independientes de información, los correspondientes mapas de peligrosidad de inundación (basados en el cálculo de la zona inundable, teniendo en cuenta, por ejemplo, criterios técnicos como la extensión y el calado de la inundación) y los mapas de riesgo de inundación (que incorporaban a la zona inundable los usos del suelo y los principales daños que se podrían esperar en caso de un evento extremo). Estos mapas resultan fundamentales para la construcción de los instrumentos que se desarrollarán en etapas posteriores; en especial, para la elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación. Con el fin de que tuvieran carácter oficial, los mismos se integraron en el Registro Central de Cartografía.

Como decimos, esta segunda etapa constituye una etapa crucial para el posterior desenvolvimiento de la Directiva, marcada por los estudios que dieron lugar a la elaboración de los instrumentos técnicos, por lo que merece la pena explicar con más detalle su configuración:

a) En el caso de los mapas de peligrosidad, lo que se hizo fue representar la superficie inundada de manera natural conforme a tres escenarios posibles (avenidas en períodos de retorno de 10, 100 y 500 años); así como en función de las profundidades (calados) que alcanzaría el agua en ese terreno en cada uno de esos escenarios. Además, se representó el dominio público hidráulico (DPH) probable y la zona de flujo preferente (ZFP) asociada a una avenida con un período de retorno de 100 años. La zonificación de áreas se hizo atendiendo a escenarios basados en la probabilidad de inundación. Se estableció un intervalo de alta probabilidad de inundación (período de retorno inferior a 100 años); probabilidad media (período de retorno mayor o igual a 100 años); y probabilidad baja o escenario sujeto a la producción de eventos extremos (período de retorno igual o inferior a 500 años).

b) Por su parte, los mapas de riesgos de inundación reflejan los daños potenciales de las inundaciones en escenarios de alta, media y baja probabilidad de inundación una vez son incorporadas las zonas inundables y los usos del suelo. De esta forma, se superponen las áreas inundadas en los tres escenarios anteriores con la ocupación real de ese territorio, obteniendo las capas de afección a la población, a la actividad económica, a las áreas protegidas y a los puntos de especial importancia. Su principal función es informar del daño producido en el caso de que se produzca finalmente la inundación, en función de los usos del suelo, por lo que se estiman variables como, por ejemplo, el número de habitantes que se podrían ver afectados o el tipo de actividad en la zona.

c) En tercer lugar, se aprobaron los Planes de Gestión de Riesgo de inundación (PGRI), el instrumento culmen que pretende servir de referencia para la ordenación y gestión. Estos planes, a los que nos referiremos más delante de forma pormenorizada, pretenden lograr la actuación coordinada de las administraciones públicas y de la sociedad para mitigar los daños que producen las inundaciones, basándose en los programas de medidas que cada una de las administraciones debe aplicar en el ámbito de sus competencias sectoriales.

Conforme a lo señalado aquí, podemos concluir que se ha cerrado con éxito esta primera etapa de construcción de la Directiva de Inundaciones. Pero aún falta por ejecutar un análisis más profundo y desarrollar nuevos estudios técnicos que permitan perfeccionar el conocimiento alcanzado. Este conocimiento avanzado se debe conseguir a través de la revisión y mejora de la cartografía de riesgos que ya ha sido aprobada (proceso iterativo de contraste con la realidad), así como a través de la utilización de mecanismos de integración normativa y de coordinación orgánica y funcional entre las diferentes administraciones públicas y agentes implicados en la gestión del riesgo de inundación.

3.3. La transposición de la directiva de inundaciones en España: el RD 903/2010, de 9 de julio, y la gestión del riesgo de inundación y la competencia en materia de seguridad pública

La trasposición de la Directiva a nuestro Ordenamiento jurídico se produjo a través de una norma reglamentaria, el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que se convierte, así, en el instrumento utilizado para introducir el contenido de la norma en España. Dicha transposición, materializada hace ahora diez años, no estuvo exenta de polémica y fue recurrida en relación a dos motivos principales de impugnación: el primero, si se infringía el principio de reserva de Ley (al haberse traspuesto al ordenamiento español por medio de una norma reglamentaria); y, el segundo, en relación a si el Estado vulneraba la competencia autonómica en materia de clasificación y calificación del suelo conforme se reconocía en el Texto Refundido de la Ley del Suelo de 2008, entonces vigente. En relación a esta segunda causa, se discutía el alcance del 15 del RD 903/2010, que, al establecer la coordinación de los PGRI con otros planes, dispone: "los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación que hagan de los usos del suelo, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los planes de gestión del riesgo de inundación, y reconocerán el carácter rural de los suelos en los que concurran dichos riesgos de inundación o de otros accidentes graves".

La STS 142/2012, de 20 de enero (rec. núm. 450/2010) resolvió el recurso contencioso-administrativo interpuesto por la Generalidad Valenciana y desestimó ambos motivos de impugnación por considerar, en primer lugar, que no se vulneraba el principio de reserva de ley. Y, en segundo lugar, por considerar que el art. 15 del RD 903/2010 no lesionaba las competencias autonómicas en materias de urbanismo, ordenación y agua que tienen atribuidas las Comunidades Autónomas por cuanto dicha regulación desarrolla la normativa básica estatal y se sustenta, fundamentalmente, en la competencia exclusiva del Estado en materia de seguridad pública (artículo 149.1.29 de la CE). Puesto que la norma se dirige a proteger a las personas, el precepto no supone una invasión de competencias, pues en caso de la ocurrencia de calamidades, como lo son las inundaciones, prevalece el título relativo a la seguridad pública previsto en artículo 149.1. 29 de la CE. De esta interpretación es posible entresacar, por tanto, que la finalidad de los planes de gestión del riesgo de inundaciones no es regular u ordenar los usos del suelo, como se ha llegado a decir, sino que, realmente, su finalidad es evitar daños ambientales y proteger a las personas y bienes.

Por lo demás, como suele ser habitual en nuestro Derecho de aguas, en la trasposición de la norma, ya de por sí compleja, por la estructura de plazos para la consecución de objetivos y la amplia dispersión normativa y competencial con la que se relaciona, se intentó conciliar la operatividad de conceptos existentes con otros nuevos, lo que planteó algunos problemas de aplicación. Así, mientras la Directiva de inundaciones contempla tres escenarios de inundación en los mapas de peligrosidad (baja probabilidad o escenario inundación por la producción de eventos extremos, probabilidad media y alta probabilidad), la transposición en España incluyó, además, la delimitación cartográfica de las zonas de inundaciones establecida, otras recogidas en la legislación de aguas de las que se compone del cauce, la zona de servidumbre, la zona de policía, además de la zona de flujo preferente. A pesar de todo, en términos generales, el cumplimiento de la Directiva de inundaciones en nuestro país ha sido adecuado, salvo contadas excepciones (vid. a este respecto, la sanción impuesta en la STJUE de 2 de abril de 2020, Asunto C-384/19, por el incumplimiento de la Directiva de inundaciones en las demarcaciones canarias).

4. LAS DIFICULTADES METODOLÓGICAS EN LA GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍAS DE ZONAS INUNDABLES

4.1. Incertidumbre científica y conflictos epistemológicos

Como venimos señalando, la cartografía de inundaciones se ha convertido en un requisito sine qua non para la instrumentación y revisión de los futuros planes de ordenación sectorial y territorial. Se trata de un documento técnico que adquiere naturaleza jurídica y obliga a una elaboración precisa (Olcina & Díez-Herrero, 2016). Su elaboración requiere del manejo de conceptos, métodos y herramientas de trabajo propias del análisis de riesgos. Sin embargo, la generación de cartografías de riesgo no es un procedimiento sencillo ni exento de incertidumbres; tanto por la ausencia de datos, como por la escasez de herramientas para realizar estimaciones de pérdidas y la necesaria actualización y revisión que conlleva este proceso dinámico. Por eso, salvo honrosas excepciones, como fue en su día la cartografía de peligrosidad de inundaciones elaborada en el año 2002 para la aprobación del Plan de Ordenación Territorial frente al Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), que tenía en cuenta períodos de retorno (25, 100 y 500 años) y altura de la lámina de agua (inferior o superior a 0,8 m), gran parte de la producción cartográfica sobre riesgo de inundaciones en España son en realidad mapas de inundabilidad, peligrosidad o riesgo específico (Díaz-Herrero & Pujadas, 2002).

En las últimas décadas se han producido avances cualitativos en el análisis y la evaluación cuantitativa de la peligrosidad y el riesgo de inundaciones. Sin embargo, como explican (Olcina & Díez-Herrero, 2007, 304-305) estas innovaciones y mejoras no se han transferido en igual medida a las cartografías temáticas asociadas (mapas de inundabilidad, mapas de peligrosidad, mapas de exposición, mapas de vulnerabilidad, mapas de riesgo y de riesgo específico), que siguen empleando las mismas fuentes, métodos y herramientas que hace al menos medio siglo; y, en algunos aspectos (como el uso exclusivo del parámetro del periodo de retorno), desde hace un siglo. Estos autores, critican, además, que los mapas no sean calibrados, ni validados; ni tengan en cuenta el destino final para el que se van a usar: gestión del riesgo, planificación territorial y urbana, sistemas de seguros y reaseguros, protección civil, educación en el riesgo, análisis costo-beneficio de medidas estructurales, etc. Así, como que, las incertidumbres (epistémicas y metodológicas), las precisiones y errores inherentes a las propias fuentes de datos, los métodos y las herramientas, no sean (salvo raras excepciones) tenidos en cuenta ni en el análisis, ni en la representación cartográfica del mismo, como sucede con relación cambio climático (Olcina & Díez, 2007).

4.2. Análisis de la cartografía de datos: evidencias y comprobaciones en los procesos de revisión y validación

Existen miles de planes urbanísticos repartidos por toda la geografía española en los que se identifica un alto porcentaje de suelo urbanizable en áreas con riesgo de inundación. La planificación territorial utiliza la cartografía de zonas inundables para acreditar el riesgo teórico. Pero la elaboración científica, rigurosa, de la cartografía de riesgo natural constituye el instrumento básico de acreditación jurídica del riesgo (Olcina & Diez-Herrero, 2017). La normativa administrativa (europea, estatal, autonómica, local) ha desarrollado instrumentos para acreditar el riesgo de inundación, y ha permitido mejorar el análisis científico, gracias a la "racionalización técnica" de los procesos naturales y a que la información contenida en el Sistema de Cartografía de zonas inundables cada vez resulta más fidedigna y contrastada.

Pese a los avances técnicos producidos en las últimas décadas, la vulnerabilidad y exposición al peligro de inundaciones se ha incrementado, empero, desde 1995, debido a la ocupación del suelo y al desarrollo de procesos urbanizadores, lo que gráficamente se ha denominado "tsunami urbanizador" (Gaja, 2008), en áreas con riesgo de inundación. El escaso empuje que ha tenido la estrategia de prevención ideada por la ordenación del territorio se debe, en gran parte, a su lentitud

transformadora, lo que ha hecho que algunos autores (Olcina, 2017) se planteen si la ordenación del territorio es una herramienta realmente eficaz para luchar contra el riesgo de inundaciones en España.

Conforme a esta idea, existe la necesidad de calibrar los mapas de inundación, corrigiendo errores y reduciendo su amplitud técnica. Pero también de fortalecer el carácter vinculante de estas informaciones en la regulación sectorial. Como construcción social, enfocada en un entorno dinámico, esta cartografía dista, obviamente, de ser perfecta. Por eso debe ser validada, como exige la normativa, con el fin de acotar la discrecionalidad técnica y las consecuencias injustas que introducen cuando su intervalo de confianza no se ajusta a la realidad a la que se dirigen, tanto a efectos probabilísticos, como determinísticos, conforme a las recomendaciones técnicas y el desarrollo cognitivo.

4.3. El afianzamiento de soportes documentales: el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas y la elaboración de guías oficiales

La información registrada en los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación se integra en el Sistema Nacional de Zonas Inundables (SNCZI). De conformidad con lo establecido en el Real Decreto 1545/2007, de 23 de noviembre, por el que se regula el Sistema Cartográfico Nacional, estos mapas se inscriben en el Registro Central de Cartografía con el fin de tener la condición de cartografía oficial. El SNCZI, accesible al público a través de un visor cartográfico de zonas inundables, recoge esta información elaborada por el Estado y las Comunidades Autónomas (la cartografía de DPH y las zonas inundables, así como los mapas de peligrosidad de inundación) y permite a todo aquel que visualice dicha información tenerla en cuenta para la defensa de sus intereses.

Otra herramienta útil es el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH), perteneciente a la Dirección General de Protección Civil. El CNIH surge de los trabajos de la Comisión Técnica de Emergencia por Inundaciones (CTEI), creada por la Comisión Nacional de Protección Civil en 1983. Desde el año 1995, sistematiza y recopila datos sobre inundaciones históricas a nivel nacional con el fin de realizar estudios probabilísticos y estudiar la ocurrencia determinística de nuevos episodios de inundación. Existen más de 2.400 referencias históricas de inundaciones en los últimos 500 años que han sido registradas y están consignadas en la base de datos del CNIH, lo que, estadísticamente, significa una “media” de, aproximadamente, cinco inundaciones de importancia al año (Comisión Técnica de Inundaciones, 1984).

En tercer lugar, encontramos instrumentos adaptativos como son la realización de guías y recomendaciones técnicas elaboradas por grupos de expertos, que sirven para interpretar homogéneamente los criterios que se desprenden de la normativa. Los propios PGRI incluyen entre las medidas de prevención en materia de ordenación del territorio y urbanismo la elaboración de estas guías técnicas que homologan la puesta en común de actuaciones administrativas y facilitan una aplicación coherente de la normativa basada en la generación de criterios constructivos, permitiendo una adaptación al riesgo en los diferentes sectores económicos al tiempo que desarrollan una estrategia de concienciación y de adaptación social. Entre las principales Guías y Recomendaciones técnicas, encontramos:

- La Guía de apoyo a la aplicación del reglamento del dominio público hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial
- La Guía para la reducción de la vulnerabilidad de edificios frente a inundaciones
- Las Guías y recomendaciones internacionales para el diseño de edificios en zonas inundables
- El Instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa.

- Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras
- Sistemas urbanos de drenaje sostenibles
- Adaptación al riesgo de inundación de explotaciones agrícolas y ganaderas. También hay de resiliencia de las ciudades, proyectos de restauración fluvial, etc.

Más allá de la funcionalidad que se desprende de estos documentos para interpretar y homogeneizar los dictados normativos, estas guías sirven para definir el estándar de "riesgo tolerable" y reducir los niveles de discrecionalidad en la toma de decisiones. Se ha destacado (Garrido, 2017, p. 160), el hecho de que la legislación del suelo debe establecer los niveles de peligrosidad en función de los cuáles se ordenarán los usos del suelo, así como remitir a normas técnicas que contemplen estas metodologías (vía indirecta) y los procedimientos para la realización los dichos mapas de riesgos que pueden ser de muy diferente índole y especialización. Y es que, solamente teniendo en cuenta los mapas de inundaciones, encontramos: topográficos, de inundabilidad, de peligrosidad cualitativa, de peligrosidad para las personas, de exposición, de vulnerabilidad frente a la inundación, de riesgo social y económico, etc.

4.4. La elaboración de un sistema propio de cartografía de zonas inundables.

Para completar este apartado, se ha señalado la dificultad de identificar la Administración competente para llevar a cabo la delimitación de las zonas inundables y las consecuencias que ello conlleva (Escartin, 2016, 2017). Esto afecta a la hora de fijar un umbral de riesgo máximo tolerable y generar instrumentos de reparación (seguros y reaseguros) en los casos en los que, abriendo el foco del debate, los ciudadanos desearan asumir riesgos no admisibles, estadísticamente hablando.

Como ha puesto de manifiesto Díez-Herrero (2017), los mapas de peligrosidad y riesgos por inundaciones tienen implicaciones técnicas y jurídicas. Entre las implicaciones técnicas destacan la incertidumbre científico-técnica, la excesiva simplificación en la modelación hidrológica e hidráulica de las avenidas (sin considerar parámetros que son significativos como la carga sólida transportada,

el lecho móvil, etc.) o el uso exclusivo, a veces, abusivo, del período de retorno como parámetro para estimar la peligrosidad. Las implicaciones técnicas se ven acompasadas por impedimentos jurídicos como son la falta de normalización de las técnicas y métodos de análisis y representación en la legislación; en el carácter pseudo-oficial u oficioso de la cartografía aun cuando ha sido producida por organismos oficiales; o en un uso errático de los períodos de retorno en la legislación sectorial (Díez-Herrero, 2017).

5. LA ORDENACIÓN DE LAS ZONAS INUNDABLES: ¿UNA FORMA DE GEOMETRÍA VARIABLE?

Conforme observamos, la regulación sectorial establece sus criterios de referencia para prevenir el riesgo de inundaciones. En función de sus características y objetivos, establecen un régimen y unas limitaciones de uso más o menos severas. Ahora bien, técnicamente, ¿qué es una zona inundable? ¿Existe una identidad de criterio?

La ordenación de las zonas inundables se define, fundamentalmente, en las legislaciones de aguas, suelo y Protección Civil, que están coordinadas por el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación que transpone a la Directiva de inundaciones. Esta norma configura la ordenación de las zonas inundable conforme a tres criterios afines, pero diferenciados: la protección del dominio público hidráulico (potestad de policía de la Administración hidráulica), la aprobación de reglas complementarias para la planificación hidrológica y, por último, la protección de las personas y bienes situados en estas zonas (ordenación del territorio y competencia en materia de seguridad pública). En estas regulaciones se encuentra un catálogo de reglas y referencias cruzadas,

a veces asincrónicas; como, por ejemplo, el concepto de "zona inundable", que, después veremos. Pero, también, incluyen referencias precisas, como la UDH (Unidad de Daños Homogeneizada), la UDHm (Unidad de Daños Homogeneizada por metro de río), el período de retorno, las Áreas de inundación basadas en referencias comprobadas a las que se les aplica un coeficiente de ponderación, etc.

Pese a los avances introducidos por el RD 386/2016 que luego comentaremos, no tenemos una metodología que goce de consenso científico y existen fuentes de error constatables (Díez-Herrero, 2017); tanto para la zona de dominio público hidráulico (máxima crecida ordinaria), como para las zonas de flujo preferente, y, en fin, para las zonas inundables (Caro-Patón & Escartín, 2017). Por ello, se ha propuesto Díez-Herrero (2017) sustituir el concepto "período de retorno", tal y como ha sido tradicionalmente considerado, que se centra en los efectos probabilísticos, por el concepto de "máximo evento registrado", el cual analizaría dos variables en profundidad: 1) el funcionamiento de los procesos físico-químicos que condicionan, desencadenan y rigen el desarrollo de las inundaciones y su peligrosidad, con el fin de establecer parámetros de maginitud máximos físicamente posibles en cada sector del territorio; y, 2) un estudio del registro de eventos extremos del pasado (período histórico y Holoceno), para la determinación de la magnitud máxima en la última decena de miles de años. Esta propuesta nos parece interesante y se ajusta a los parámetros que maneja, por ejemplo, la legislación de costas, a la hora de delimitar el deslinde hasta donde alcancen los "mayores temporales conocidos", conforme a criterios de "marea máxima viva equinoccial", independientemente de las dificultades probatorias que entraña como hemos analizado en otro trabajo (Navarro, 2017).

5.1. Definición de "zona inundable" en la legislación de aguas

El artículo 28.2 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN), establece la necesidad de delimitar la zona inundable en aras a proteger el dominio público y, en consecuencia, a las personas. Pero no señala la Administración competente a estos efectos ("las Administraciones competentes delimitarán las zonas inundables…"). Para conseguir este objetivo se adoptarán las medidas necesarias que afecten a la protección del DPH, "incluyendo la eliminación de construcciones y demás instalaciones situadas en el mismo", promoviendo los expedientes de deslinde en ríos, arroyos y ramblas (art. 28.1 del PHN) y estableciendo un principio de colaboración administrativa entre la Administración del Estado y las Administraciones Autonómicas y Locales (a través de Convenios) en las zonas inundables que pudieran implicar un grave riesgo para las personas y bienes (art. 28.3 del PHN). En zonas urbanas, se dispone, las actuaciones en cauces públicos "corresponderán a las Administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo, sin perjuicio de las competencias de la Administración hidráulica sobre el dominio público hidráulico" (art. 28.4 del PHN). El precepto, no entra, en modo alguno, a definir a quién le correspondería ejecutar esta competencia.

El artículo 11 del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (en adelante, TRLA), define las zonas inundables como "los terrenos que puedan resultar inundados durante las crecidas no ordinarias de los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos", señalando, que, "los Organismos de cuenca darán traslado a las Administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo de los datos y estudios disponibles sobre avenidas, al objeto de que se tengan en cuenta en la planificación del suelo y, en particular, en las autorizaciones de usos que se acuerden en las zonas inundables". La definición de "inundabilidad", a efectos técnicos, resulta insuficiente, pero resalta que, a diferencia de lo que sucede con el deslinde de dominio público hidráulico, su delimitación no altera la calificación jurídica del terreno ni a la titularidad dominical que tuviere, imponiendo únicamente limitaciones sobre su uso y disfrute. Un terreno no pasa a ser dominio público por el mero hecho de estar en zona inundable.

El art. 3, letra m) del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión del riesgo de

inundación, define como zona inundable "los terrenos que puedan resultar inundados por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de 500 años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas en los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos, así como las inundaciones en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición. La referencia a los estuarios como zonas de abrigo y refugio para mitigar los riesgos naturales y prevenir los efectos del cambio climático resulta acertada. Dichos terrenos y espacios cumplen labores de retención o alivio de los flujos de agua y carga sólida transportada durante las crecidas y sirven como resguardo contra la erosión (Navarro, 2019).

Por su parte, el art. 14.1 del RDPH (conforme a la redacción del art. 1.7 del RD 638/2016, de 9 de diciembre), define a la zona inundable de forma más completa: "Se considera zona inundable los terrenos que puedan resultar inundados por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de 500 años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas en los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos. Estos terrenos cumplen labores de retención o alivio de los flujos de agua y carga sólida transportada durante dichas crecidas o de resguardo contra la erosión. Estas zonas se declararán en los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos". La anterior reforma, operada por el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, introdujo que la delimitación de las zonas inundables debía hacerse valorando "estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas", si bien seguía admitiéndose que el Ministerio fijase a los debidos efectos la delimitación de estas zonas inundables de forma discrecional, atendiendo al caso concreto. Esta posibilidad desaparece con la nueva redacción, de manera que la delimitación depende exclusivamente de los documentos, evidencias y estudios que puedan recabarse y determinen, en consecuencia, la decisión y resulta acertada (Escartín, 2017).

5.2. La definición de "zona inundable": crecidas no ordinarias y poco más

Las definiciones anteriores ilustran el carácter excepcional o "inusual" que se debe desprender de la inundación, conllevando el desbordamiento de agua en la zona afectada para que pueda ser calificada como "inundable". Pero, en algunos casos, adolecen de una descripción detallada de cuándo, dónde, cada cuánto o cómo se ha de producir dicha inundabilidad. La recurrencia, a efectos estadísticos, se fija en 500 años, o menos (existen zonas en las que se tienen en cuenta períodos de retorno de hasta cinco años, lo cual es, poco significativo) conforme a registros contrastados en estudios, documentos o evidencias históricas.

En todo caso, la definición de zona inundable pende de la producción de eventos hidrológicos extremos y avenidas no ordinarias en ríos, desembocaduras, arroyos, lagos, lagunas o embalses. Es decir, de que se produzca un aumento "inusual" y "extraordinario" del caudal de agua que produzca desbordamientos por encima de los límites del cauce ordinario o del lecho de río. A estos efectos, se ha señalado (Escartín, 2016) la conveniencia de incluir los cauces y los lechos dentro de la ordenación urbanística, apostando por un concepto amplio de zona inundable, para generar una zonificación urbanística ampliada más coherente con la naturaleza inundable de estos espacios y con el concepto propio de planificación urbanística.

5.3. El establecimiento de zonas complementarias de protección frente al riesgo de avenidas

Junto a la zona inundable (ZI) de la legislación de aguas, existen otros conceptos de inundabilidad que ordenan los usos del territorio. Así encontramos referencias que atienden a una limitación de usos desde la perspectiva de la protección del DPH (zonas de servidumbre y de policía); que desarrollan el concepto de inundabilidad conforme a un perfil técnico (zona de flujo preferente); o que se basan en criterios indeterminados (máxima crecida ordinaria). Estas definiciones se completan en razón de

otras regulaciones sectoriales, que inciden en la relación espacial que existe entre ecosistemas, hábitats, y personas, también a efectos de inundación (zona de regresión grave, zonas de inundación frecuente, ocasional y excepcional, etc.).

5.3.1. Las zonas de servidumbre y de policía del dominio público hidráulico

El artículo 6 del TRLA define las riberas de los ríos, señalando, como tales, las fajas laterales de los cauces públicos situadas por encima del nivel de aguas bajas, y por márgenes los terrenos que lindan con los cauces. Las márgenes del río están sujetas, en toda su extensión longitudinal: 1) A una zona de servidumbre de cinco metros de anchura, para uso público que se regulará reglamentariamente; y, 2) A una zona de policía de 100 metros de anchura en la que se condicionará el uso del suelo y las actividades que se desarrollen. En especial, señala el art. 9 del Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), quedan condicionados en esta zona, las construcciones, tengan carácter definitivo o provisional, así como el uso o actividades que supongan un obstáculo para la corriente en régimen de avenidas o que pueda ser causa de degradación o deterioro del estado de la masa de agua, del ecosistema acuático, y en general, del dominio público hidráulico.

La reforma operada por el RD 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el RDPH ampara la posibilidad de ampliar ambas zonas (de servidumbre y de policía) si fuera necesario para incluir el área donde se concentra preferentemente el flujo, al objeto específico de proteger el régimen de corrientes en avenidas, y reducir el riesgo de que se produzcan daños. Especialmente en las zonas próximas a la desembocadura en el mar, en el entorno inmediato de los embalses o cuando las condiciones topográficas o hidrográficas de los cauces y márgenes lo hagan necesario para la seguridad de personas y bienes.

5.3.2. La zona de flujo preferente

Como hemos visto, la Directiva de inundaciones contempla tres escenarios de inundabilidad. Frente a ella, la transposición de la norma, añadió la Zona de Flujo Preferente (ZFP), que es definida, conforme al art. 3 letra o) del RD 903/2010, por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe (VID), y de la zona donde, para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, o zona de inundación peligrosa (ZIP), quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas.

A los efectos de aplicación de la definición anterior, se considerará que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

- Que el calado sea superior a 1 m.
- Que la velocidad sea superior a 1 m/s.
- Que el producto de ambas variables sea superior a 0,5 m^2/s.

La vía de intenso desagüe alcanza la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobreelevación mayor que 0,3 m, respecto a la cota de la lámina de agua que se produciría con esa misma avenida considerando toda la llanura de inundación existente. Ahora bien, la sobreelevación anterior podrá, a criterio del organismo de cuenca, reducirse hasta 0,1 m cuando el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5 m en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos.

En la delimitación de la zona de flujo preferente se emplea toda la información de índole histórica y geomorfológica existente, a fin de garantizar la coherencia de los resultados con las evidencias físicas disponibles sobre el comportamiento hidráulico del río, y la acción combinada con el mar en la zona

de transición. Los planes hidrológicos de cuenca, asimismo, identifican las actividades que se consideran vulnerables y que no pueden ser autorizadas en la zona de flujo preferente, garantizando una mayor integración. Sin embargo, la regulación de un régimen específico para las zonas de uso preferente distinto de la zona de policía del DPH, puede restar eficacia a la posibilidad de ampliar la zona de policía, como se ha señalado (Caro-Patón & Escartín, 2017).

5.3.3. La máxima crecida ordinaria en relación a los máximos caudales instantáneos anuales en régimen natural

Un aspecto a considerar se refiere a la "información disponible suficiente" para determinar cuándo se produce una situación de máxima crecida ordinaria en relación a los máximos caudales instantáneos anuales en su régimen natural. El art. 14.2. del RDPH, señala: *"*En los tramos de cauce donde exista información hidrológica suficiente, se considerará caudal de la máxima crecida ordinaria la media de los máximos caudales instantáneos anuales en su régimen natural, calculada a partir de las series de datos existentes y seleccionando un período que incluirá el máximo número de años posible y será superior a diez años consecutivos. Dicho periodo será representativo del comportamiento hidráulico de la corriente y en su definición se tendrá en cuenta las características geomorfológicas, ecológicas y referencias históricas disponibles". Conforme hemos comentado en apartados anteriores, para calcular este concepto, sería apropiado incluir cálculos de series históricas, a modo de lo que ya se hace en algunas Comunidades Autónomas, como se recoge en tanto en el estudio histórico como de paleocrecidas del Decreto 258/2007, de 13 de julio, por el que se establece el contenido y procedimiento de los estudios de inundabilidad en el ámbito del Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia.

5.3.4. Crítica a la multiplicidad de conceptos

La acumulación de conceptos técnicos (qué duda cabe, que desde el plano teórico todos tienen su razón de ser y responden a la necesidad de racionalizar el riesgo) puede enmascarar el objetivo básico de la gestión integrada de inundaciones, basado en la ordenación de las zonas inundables en función de los usos del suelo (Berga, 2011). La superposición de conceptos, refleja un conocimiento teórico de las dinámicas que se dan en estos espacios, pero complican la revisión de los planes de gestión de riesgo de inundaciones, que tienen plazos de consecución cortos: su elaboración y tramitación, complejas, se intercala con la compleja tarea de revisión de los Planes hidrológicos de demarcación, por lo que el personal de los Organismos de cuenca difícilmente puede dedicar atención exclusiva durante las serie temporales que transcurren entre un ciclo de planificación y otro. Consideramos, por tanto, que sería deseable una simplificación conceptual de estos espacios.

6. LA RELEVANCIA DE LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES

6.1. Los PGRI como instrumento vertebrador para la gestión del riesgo de inundaciones

La aprobación de los PGRI supone la culminación del proceso técnico emprendido por la Directiva de inundaciones, delimitando las zonas inundables y estratificando el riesgo de inundaciones en el conjunto de la geografía española (se aprueba un plan por cada demarcación hidrográfica). Su importancia estratégica no reside en el hecho de que sea un instrumento técnico depurado, sino en la capacidad de establecer mecanismos de coordinación normativa y administrativa que conducen a una integración de políticas sectoriales: protección y defensa del dominio público (DPH y DPMT), protección civil, patrimonio histórico-cultural y natural, preservación ambiental, ordenación del territorio y urbanística.

La finalidad de los PGRI no es la de ordenar los usos del suelo, sino proteger la seguridad de las personas y bienes. Pero, como toda norma que se proyecta sobre el territorio, conlleva una adaptación de los usos del suelo y de la disciplina territorial (Molina, 2010). La aprobación del RD 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el RDPH les otorga a estos planes una dimensión más

funcional, si cabe, al incidir en las competencias autonómicas en materia de ordenación urbanística y territorial.

6.2. Estructura, contenidos y funcionalidad

Los PGRI contienen información relevante del uso del suelo, de la cartografía de zonas inundables, e introducen un conjunto de reglas, objetivos, programas y recomendaciones a los poderes públicos y particulares. El criterio geográfico, cada una de las demarcaciones hidrográficas sobre las que se proyectan, resulta acertado; así como la utilización de cartografías de peligrosidad y riesgo que recogen las conclusiones de la evaluación preliminar del riesgo de inundación.

Los mapas de inundaciones introducen respuestas tangibles frente al riesgo de inundaciones, como son las medidas de restauración fluvial y la restauración hidrológico-agroforestal de las cuencas; las medidas de mejora del drenaje de infraestructuras lineales; las medidas de predicción de avenidas; las medidas de protección civil; las medidas de ordenación territorial y urbanismo. Esta visión se complementa con la aprobación de programas de medidas específicos en función de las prioridades que detecta cada Administración competente. Una cuestión que resulta interesante, es que los programas se subdividen en subprogramas, de los cuáles serán responsables los órganos administrativos encargados de su elaboración, aprobación y ejecución, generando una mayor participación y pluralidad.

6.3. La naturaleza jurídica de los PGRI

Se ha señalado (Menéndez Rexach, 2016, 2017), que el contenido de los PGRI no tiene carácter normativo y que, por tanto, los PGRI no establecen limitaciones de usos. Como indica este autor, "no todos los planes tienen un contenido normativo. Lo tienen, al menos en parte, los planes de ordenación territorial y urbanística (en su normativa u ordenanzas). No lo tienen los planes de infraestructuras críticas (al ser secretos), los planes de protección civil (al ser operativos) y los planes de gestión del riesgo de inundaciones (Menéndez Rexach, 2017, p. 62). Para este autor, los PGRI recogen una recopilación de datos (incluidos los relativos a la normativa aplicable) e informaciones, así como una definición de objetivos, programas y pautas de actuación, que no pasan de ser recomendaciones, recordatorios de la legislación aplicable y una lista de actuaciones a llevar a cabo, que constituyen el núcleo del programa de medidas (Menéndez Rexach, 2017, 57). De esta forma, lo único que hacen es referenciar esas reglas jurídicas. Las limitaciones al uso del suelo en las zonas inundables, de esta manera, se establecen a través de los Planes hidrológicos de demarcación (PHD), en los que los mismos se integran. Esta tesis es compartida por Caro-Patón & Escartín (2017), que señalan que, con su aprobación, se consigue establecer un carácter informador e integrador, que prescinde de la imposición (no son planes vinculantes) y que opta por la "seducción".

Desde otra perspectiva, se ha discutido si la naturaleza jurídica de los PGRI puede calificarse como disposiciones generales o actos administrativos. Para Caruz (2020) son disposiciones generales en tanto son aplicables a su aprobación los mismos requisitos que a otras disposiciones reglamentarias estatales. En el caso concreto de los PGRI intracomunitarios, se plantea una cuestión añadida: si los referidos instrumentos de planificación son disposiciones generales o actos administrativos estatales o autonómicos. La Abogacía del Estado, como explica este autor, sostiene que, cuando el Gobierno los aprueba, ejercita una potestad reglada, que se limita a verificar que la administración autonómica ha observado el contenido y los requisitos preceptivos mínimos a que debe ajustarse su actividad planificadora, son "actos singulares de aprobación", cuyos eventuales defectos son independientes de los que puedan afectar a los planes aprobados. Cuestión que no es compartida por Caruz (2020) por cuanto considera que "el mayor o menor grado de discrecionalidad de la Administración General del Estado a la hora de aprobar definitivamente unos planes, no comporta la modificación de la naturaleza jurídica del plan como disposición general de carácter estatal", como sí sucede, por el contrario, con los planes generales de la planificación urbanística.

6.4. El impacto económico de los PGRI y la condicionalidad de las ayudas económicas

La gestión del riesgo de inundación es una labor que se desarrolla en diferentes niveles administrativos (por ejemplo, planes de protección civil, seguros, ordenación del territorio, costas, etc.). Los PGRI no conllevan aparejados por sí mismos dotaciones presupuestarías, por lo que sus objetivos dependen de otras actuaciones sectoriales en las que se insertan. En los planes actuales se ha optado, incluso, por no incluir una estimación del coste que tendrán para la ciudadanía determinadas actuaciones públicas que llevan aparejadas, aunque sí se hace referencia a las necesidades reales de inversión. Esta falta de información ha sido criticada, por parte del Tribunal de Cuentas (2018), desde el punto de vista de la rendición de cuentas, el control financiero y la *accountability*.

Por otro lado, cuando se producen inundaciones que causan daños extraordinarios es común que se otorguen ayudas en el marco de la legislación de subvenciones y de protección civil, además de los instrumentos de resarcimiento e indemnización que se arbitran a través del Consorcio de Compensación de Seguros. Estas ayudas se conceden directamente a los afectados, sin necesidad de concurso. Este sistema, que es regulado por la normativa general y específica, tiene una referencia explícita en el Real Decreto 307/2005, de 18 de marzo, por el que se regulan las subvenciones en atención a determinadas necesidades derivadas de situaciones de emergencia o de naturaleza catastrófica, que actúa con carácter subsidiario con respecto a cualquier sistema de cobertura de daños, público o privado. La norma establece un procedimiento específico de subvención que se adapta al procedimiento general establecido en la ley de subvenciones. Pero, la mayoría de las ayudas, como es lógico, se aprueban en situaciones de gran urgencia y emergencia social, por lo que su tramitación, en forma de Decreto-Ley es muy difícil de controlar. El establecimiento de un análisis coste-beneficio en materia de inundaciones, sin duda, también debe considerar este tipo de coberturas que se producen a fondo perdido, así como el coste que tiene para la administración el indemnizar a los particulares ante los daños provocados por una inundación en los que se declara la existencia de responsabilidad pública. Esta cuestión, creemos, entronca con la necesidad de articular un verdadero sistema de responsabilidad pública en materia de inundaciones, cuestión que está pendiente de resolver.

7. LA GESTIÓN ESTRATÉGICA DEL RIESGO DE INUNDACIONES DESDE LA PERSPECTIVA DE LA INTEGRACIÓN SECTORIAL

7.1. La planificación hidrológica en la gestión de inundaciones

El artículo 42 del TRLA incluye como contenido obligatorio de los planes hidrológicos la incorporación de "los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos". Esta coordinación y coherencia de contenidos se debe lograr a través de los programas de medidas que incorporan los planes de gestión de riesgos de inundación y los planes hidrológicos. El art. 41.4 del TRLA, ordena que: "los planes hidrológicos se elaborarán en coordinación con las diferentes planificaciones sectoriales que les afecten, tanto respecto a los usos del agua como a los del suelo, y especialmente con lo establecido en la planificación de regadíos y otros usos agrarios". La integración que se produce entre los PGRI y los Planes hidrológicos de cuenca (PHC) es clara: los primeros forman parte de los segundos (art. 14.3 RD 903/2010). Ambos planes son aprobados por el Gobierno de la Nación, y, aunque cuenten con su propio procedimiento de tramitación, la Evaluación Ambiental Estratégica es realizada conjuntamente.

7.2. La ordenación de las zonas inundables en materia de ordenación del territorio y urbanística

Como señala Escartín Escudé (2016, 276), la ordenación urbanística resulta imprescindible para dejar expeditas las zonas inundables, pero esa será una previsión que encontrará mayor eficacia en el futuro,

pues el problema principal se sigue planteando con las zonas inundables que ya se encuentran urbanizadas y edificadas. El Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, establece la necesidad de armonizar la naturaleza sectorial de los planes y programas (urbanísticos, hidrológicos, de protección civil, etc.) con los instrumentos para la gestión del riesgo de inundaciones. La norma introduce modificaciones que afectan a la limitación de usos en las zonas inundables, además de capitalizar otras cuestiones que afectan al régimen demanial (cumplimiento del régimen de caudales ecológicos, ampliación del concepto de reservas hidrológicas o desarrollo del Censo de vertidos autorizados y el Censo Nacional de Vertidos). La norma introduce en el RDPH una regulación detallada y con carácter de legislación básica de los usos y construcciones prohibidos y permitidos con determinadas condiciones en las zonas inundables de los cauces del dominio público hidráulico (Lozano & Vázquez, 2017). La STS de 10 de junio de 2019 (rec. casación 477/2017), ha reafirmado la validez de este planteamiento al concluir que la aprobación de esta norma no invade las competencias autonómicas, ni tampoco resulta incompatible con el planeamiento urbanístico, toda vez que las medidas y limitaciones establecidas se refieren a las previsiones de peligrosidad y riesgo de inundación.

El RD 638/2010, modifica el art. 15.1 del RD 903/2010, obliga a que se complementen las informaciones contenidas en los planes de ordenación territorial y urbanística con las contenidas en los PGRI. El precepto dispone: "Los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación que hagan de los usos del suelo, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los planes de gestión del riesgo de inundación, ni con la normativa sectorial aplicable a cada origen de inundación". La anterior redacción del precepto se remitía al contenido obligatorio de los PGRI, que se debería incluir en las medidas de ordenación territorial y urbanísticas adoptadas por las Administraciones competentes, como recoge la Parte A.5 del Anexo del RD 903/2010, al señalar, expresamente, que los PGRI deben contener "Las limitaciones a los usos del suelo planteadas para la zona inundable en sus diferentes escenarios de peligrosidad, los criterios empleados para considerar el territorio como no urbanizable, y los criterios constructivos exigidos a las edificaciones situadas en zona inundable (…). Las medidas previstas para adaptar el planeamiento urbanístico vigente a los criterios planteados en el plan de gestión del riesgo de inundación, incluida la posibilidad de retirar construcciones o instalaciones existentes que supongan un grave riesgo, para lo cual su expropiación tendrá la consideración de utilidad pública". Conforme a la nueva redacción, el contenido es más claro y explícito.

El ordenamiento establece, es cierto, la obligación de blindar las zonas inundables, si bien son los planes urbanísticos y de ordenación del territorio son los que deben tomar la iniciativa al respecto. Y es que, como se ha defendido, la clasificación del suelo se hace a través del planeamiento urbanístico que se debe adaptar a los mapas de peligrosidad; quizás no debería ser así, como señala (Menénez Rexach, 2015) pero, mientras ello suceda, éstos no tienen efectos derogatorios automáticos sobre la clasificación actual del suelo (Caro-Paton & Escartín, 2017, 439). Por tanto, los PGRI pueden disponer los usos del suelo, pero siguen siendo los planes urbanísticos y de ordenación del territorio los encargados de ordenar esos usos del suelo. Ello no evita que, a partir de ya, la ordenación del territorio y urbanística se tengan que adaptar preceptivamente a los contenidos de los PGRI bajo la amenaza del incumplimiento que, en caso contrario, se produciría. Por el momento, ya se ha explorado la vía de la responsabilidad frente a una deficiente actuación planificadora o actividad in vigilando por parte de las administraciones públicas por desoír riesgos calculados como ha estudiado Conde (2015). La cuestión estriba en la interpretación jurisprudencial que se realice de la adaptación a este riesgo en el planeamiento; o, con posterioridad al mismo, como así ha dictaminado la jurisprudencia y así hemos recogido en otros trabajos (Arana et al., 2016).

7.2.1 La ordenación de las zonas inundables en situaciones de suelo urbanizado. Implantación de nuevos usos del suelo

El artículo 16 del Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana (TRLS), impone la necesidad de evitar, entre otros, los riesgos de inundación, así como daños o perjuicios a terceros o al interés general, incluidos los medioambientales, remitiendo a la legislación específica para su desarrollo. La situación básica en la que se encuentra el suelo es la de suelo urbanizado y suelo rural (art. 21.1 TRLS). El art. 21.2 a) TRLS señala, en relación al suelo rural que, será "en todo caso, el suelo preservado por la ordenación territorial y urbanística de su transformación mediante la urbanización, que deberá incluir, como mínimo, los terrenos excluidos de dicha transformación por la legislación de protección o policía del dominio público, de la naturaleza o del patrimonio cultural, los que deban quedar sujetos a tal protección conforme a la ordenación territorial y urbanística por los valores en ellos concurrentes, incluso los ecológicos, agrícolas, ganaderos, forestales y paisajísticos, así como aquéllos con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación o de otros accidentes graves, y cuantos otros prevea la legislación de ordenación territorial o urbanística".

El TRLA y el RDPH, por su parte, regulan las zonas asociadas al cauce de los ríos y las limitaciones a los usos del suelo en dichas zonas. La modificación del RDPH mediante el Real Decreto 638/2016 recoge la gestión de los riesgos de inundación a través de la identificación de aquellos usos y actividades vulnerables frente a avenidas y establece limitaciones de usos, según la peligrosidad calculada (arts. 9, 9 bis, 9 ter, 9 quáter, 14 y 14 bis del RDPH).

En el caso de edificaciones existentes, la norma permite la construcción de nuevas edificaciones, ya sean edificaciones a construir en suelos urbanizados, así como para el caso de las edificaciones existentes, siempre y cuando las administraciones competentes fomenten la adopción de medidas de disminución de la vulnerabilidad y autoprotección, de acuerdo con lo establecido en la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil y la normativa de las comunidades autónomas. En este sentido, se establece un completo catálogo de medidas (al cuál no nos podemos referir aquí dada su extensión) que completa el esquema general en el plano predictivo, preventivo y correctivo. Y se obliga al promotor a suscribir una declaración responsable, que se integra en el procedimiento autorizatorio, mediante la cual se exprese claramente que se conoce y asume el riesgo existente y las medidas de protección civil aplicables al caso, comprometiéndose a trasladar esa información a los posibles afectados, con independencia de las medidas complementarias que estime oportuno adoptar para su protección.

En la ZFP, se imponen limitaciones a los usos vulnerables frente a avenidas o que supongan una reducción de la capacidad de desagüe. En la ZI se establecen criterios de construcción para las edificaciones destinadas a viviendas y recomendaciones de seguridad para otros usos.

Los preceptos no se limitan a establecer efectos clasificatorios sobre el suelo con riesgo de inundación, sino que, además, entran a controlar las características y requisitos que tendrán que cumplir las edificaciones que se encuentren bajo riesgo de "inundación existente", aclarando los usos del suelo. Teniendo en cuenta el riesgo y el tipo de inundación existente, estableciendo, en el caso de los nuevos usos residenciales, un período de retorno de 500 años. Asimismo, se regulan usos específicos del suelo: garajes, sótanos, medidas de accesibilidad, cotas de construcción, zonas destinadas a alojamientos en campings, centros penitenciarios, depuradoras, etc. El elevado nivel de detalle de la norma, nos hace plantearnos si, tal vez, no hubiera sido mejor trasladar esa información y exigencias al ámbito urbanístico, donde son más propias.

Por otro lado, se ha criticado (Romero, 2020) el hecho de que el Real Decreto 638/2016 introduzca una vinculación singular que afecta a las zonas inundables y de flujo preferente determinadas en el

Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, por la cual se alteran *ad casum* las condiciones de zonificación establecidas en el correspondiente plan de ordenación, de tal manera que conllevan una reducción generalizada del aprovechamiento urbanístico o una restricción de los usos que puede derivar en un detrimento del valor de un inmueble, en comparación con los del resto de la zona y, en consecuencia, genera el correspondiente derecho a una indemnización que restituya el trato discriminatorio. La autora señala cómo en el caso del suelo en situación de urbanizado la "Guía técnica de apoyo a la aplicación del reglamento del dominio público hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial", mantiene, erróneamente, que la situación básica de suelo urbanizado coincide plenamente con la del suelo urbano. Tal aserto, nos dice, "es una simplista generalización ya que, ante un supuesto concreto, hay que acudir al plan urbanístico en el que se ofrecen situaciones muy heterogéneas, refractarias a ese postulado, máxime, si como es frecuente, se trata de planes en vigor desde hace decenios" (Romero, 2020, p. 12).

En relación a la implantación de nuevos usos del suelo, se establece un régimen especial para municipios con alta inundabilidad: concretamente, para municipios con más de 1/3 de su superficie incluida en la ZFP, o en los que por la morfología de su territorio tengan una imposibilidad material para orientar sus futuros desarrollos hacia zonas no inundables. De esta forma, abre el debate acerca de cuál debe ser la tolerancia admisible al riesgo, o, dicho de otra forma, si existe el concepto de "riesgo admisible" para desarrollar edificaciones en terrenos que soporten inundaciones hasta un grado determinado. Esta interpretación puede resultar problemática, sobre todo, en lo que se refiere a los términos de aplicación retroactiva de la ley y el carácter paliativo de las medidas que introduce. O, por el hecho de que no introduzca medidas complementarias de reaseguro para compensar los daños que se puedan producir. La finalidad de estos artículos se dirige, en todo caso, a garantizar la seguridad de las personas y bienes, por lo que habrá que estar muy atentos a la regulación que en desarrollo puedan establecer las CC.AA.

En general, los preceptos mencionados disponen un régimen más limitativo, aunque progresivo y con excepciones, de utilización del suelo en las zonas inundables que abarca, desde la prohibición más absoluta, hasta la consolidación de zonas urbanas en núcleos de población que se encuentran en zonas inundables, siempre que se cumplan los requisitos técnicos que establece. En todo caso, el contenido normativo deberá ponderarse con otras informaciones, como, por ejemplo, la Memoria de los planes hidrológicos que contiene, informaciones relevantes para la prevención del riesgo de inundaciones, así como datos de crecidas históricas, la determinación de zonas de riesgo potencial, y acciones recomendadas para la gestión de presas, encauzamientos, drenajes, o para la protección de cauces, por citar algunas.

7.2.2 Observaciones sobre la ordenación de las zonas inundables en la regulación autonómica

Las Comunidades Autónomas, además de aprobar los PGRI en las cuencas intracomunitarias, pueden establecer normas adicionales de protección para limitar el uso de las zonas inundables de acuerdo a sus competencias en materia de ordenación del territorio, respetando la regulación establecida para la protección el DPH. En este sentido, encontramos diferentes intentos que han servido con mayor o menor éxito a este propósito: el Plan de Prevención de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces, aprobado por el Decreto 189/2002, de 2 de julio; el Plan de acción territorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), aprobado mediante Decreto 201/2015; el Documento de recomendaciones técnicas sobre la interpretación y aplicación de la Ley 5/2006, de 2 de mayo, de Ordenación del Territorio y Urbanismo de La Rioja; los Planes de Ordenación Territorial de Navarra, en su Anexo PN5 "Criterios relativos a la Zonificación de Áreas Inundables y Usos Admisibles en las mismas"; o el Plan Territorial Sectorial de Ordenación de los Ríos y Arroyos de la CAPV (Vertientes Cantábrica y Mediterránea), aprobado mediante Decreto 443/2013. En algún caso, incluso, se mantiene la exigencia, un tanto anacrónica, de que los riesgos naturales o tecnológicos "queden acreditados" [art. 83.1 a) Ley 13/2015, de 30 de

marzo, de ordenación del territorio y urbanismo de la Región de Murcia].

Una de las regulaciones más completas, como ha explicado Menéndez (2016) era la contenida en el art. 6 del Reglamento de la Ley de Urbanismo de Cataluña, aprobado en 2006 y que ha sido derogado por el art. 9 de la disposición derogatoria 1 de la Ley catalana 5/2017, 28 marzo. Esta disposición regula un sinfín de cuestiones (medidas fiscales, administrativas, financieras y del sector público, creación y regulación de los impuestos sobre grandes establecimientos comerciales, estancias en establecimientos turísticos, sobre elementos radiotóxicos, sobre bebidas azucaradas envasadas y sobre emisiones de dióxido de carbono), pero, curiosamente, no se incluye en su rúbrica nada que a priori pudiera tener relación con las inundaciones. El citado precepto distinguía tres franjas de terreno dentro de la zona inundable (la zona fluvial, la zona de sistema hídrico y la zona inundable por episodios extraordinarios), estableciendo un régimen aplicable a cada una de ellas con diferentes intensidades de uso que iban, desde la máxima limitación, a situaciones más flexibles que podían ser objeto de transformación si el planeamiento urbanístico, con el informe favorable de la administración hidráulica, preveía la ejecución de las obras necesarias para que las cotas definitivas resultantes de la urbanización cumplieran las condiciones según el grado de riesgo de inundación establecido por el indicado planeamiento.

7.3. Referencias a otros regímenes sectoriales y de protección

7.3.1. La planificación en materia de protección civil

La integración de riesgos en la ordenación territorial y urbanística tiene su corolario en otra planificación sectorial (infraestructuras críticas, protección civil y situaciones meteorológicas extremas) donde existen planes, de índole muy diferente, que permiten gestionar el riesgo de inundaciones. Las competencias concurrentes también son, en estos ámbitos, una nota característica, por lo que se producen discrepancias y contradicciones para establecer criterios de prevalencia. Por eso, es preciso que, los problemas de articulación entre los planes de ordenación del territorio y urbanística y los planes sectoriales que tienen en cuenta los riesgos naturales o tecnológicos se aborden sobre la base de la prevención la coordinación administrativa, tanto en la fase de elaboración, como de ejecución de estos instrumentos (Menéndez, 2017).

Las SSTC 123/1984 y 133/1990, definen la protección civil como el "conjunto de acciones dirigidas a evitar, reducir o corregir los daños en personas o bienes derivados de toda clase de medios de agresión o elementos naturales o extraordinarios en tiempos de paz que, por su gravedad, tengan carácter de calamidad pública". La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de interior) ordena el régimen de inundaciones en materia de Protección Civil, siendo las Comunidades Autónomas quienes desarrollan los Planes Territoriales de Inundaciones, que son homologados por la Comisión Nacional de Protección Civil. En estos planes se identifican y clasifican las áreas inundables del territorio conforme a criterios que, establecen períodos de retorno *ad hoc*. Así, encontramos, en primer lugar, la "Zona de inundación frecuente", que se refiere a espacios inundables para avenidas de período de retorno de cincuenta años; en segundo lugar, las "Zonas de inundación ocasional", que delimita las zonas inundables para avenidas de período de retorno entre cincuenta y cien años; y, en tercer lugar, las "zonas de inundación excepcional", que se refiere a zonas inundables para avenidas de período de retorno entre cien y quinientos años.

A nivel planificador, existe un amplio elenco de planes de protección civil: Plan Estatal General, los Planes Territoriales (de ámbito autonómico y local), los Planes especiales y los Planes de autoprotección.

7.3.2. Planes de protección de las infraestructuras críticas.

La Estrategia de Seguridad Nacional de 2017 (RD 1008/2017, de 1 de diciembre) aprobada conforme

a la Ley de Seguridad Nacional (Ley 36/2015, de 28 de septiembre) establece entre sus objetivos los relativos a la protección de las infraestructuras críticas, la protección ante emergencias y catástrofes y la protección del medio ambiente (Menéndez Rexach, 2017). Como explica este autor, si ya es difícil establecer las relaciones de primacía entre planes sectoriales, mucho más complicado parece establecer su primacía cuando el contenido de los mismos es secreto, como sucede con los de infraestructuras críticas dada la materia tan sensible que regulan. En todo caso, la protección de estas infraestructuras resulta esencial para proteger a la población frente a inundaciones, tanto desde el punto de vista de la prevención (embalses de laminación, tanques de tormenta…) como desde la optimización de su funcionamiento y la salvaguarda frente a ataques provocados.

7.3.3. Evaluación ambiental estratégica conjunta y gestión del riesgo de inundación

Cada vez más, se insiste en la necesidad de realizar una gestión ecológica de los ríos y de incentivar la generación de infraestructuras verdes. Pero ello no es incompatible con la utilización de medidas tradicionales e infraestructuras grises en los casos en que sea preciso, pues estas también resultan efectivas. Los PGRI se someten a evaluación ambiental estratégica ordinaria, conforme a lo dispuesto en la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. En relación a los mismos, se han sometido paralelamente con los Planes hidrológicos de cuenca (tercer ciclo) con los PGRI para el período 2021-2027 (segundo ciclo) y el Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (DSEAR). El proceso de evaluación se ha hecho coincidir para favorecer la retroalimentación entre los diferentes instrumentos. Se ha puesto especial énfasis en la elaboración de un estudio ambiental estratégico conjunto del PHC y del PGRI, para discutir el contenido en detalle de ambos documentos, analizar sus interrelaciones e integrar la parte ambiental. En muchos casos, los objetivos que persiguen estos instrumentos son compartidos: contribuir a la mejora o al mantenimiento del buen estado de las masas de agua a través de la mejora de sus condiciones hidromorfológicas, mejora de la resiliencia y disminución de la vulnerabilidad de los elementos ubicados en las zonas inundables, mejora de la coordinación administrativa, cumplimiento de los objetivos dispuestos en la Directiva marco de aguas [COM (2015), AEMA (2016)].

Del mismo modo, la construcción de infraestructuras dirigidas a prevenir y corregir el riesgo de inundación también tendrá que superar el procedimiento de evaluación ambiental cuando lo exija la normativa.

7.3.4. La gestión del riesgo de inundaciones y su enfoque basado en la legislación de costas

Las inundaciones repentinas y los temporales marítimos (con sus afecciones en tierra) son las que mayores daños y víctimas mortales han provocado en las últimas décadas. La desnaturalización de los entornos costeros trae causa en la transformación de los ríos o en actuaciones que alteran el oleaje y el régimen de vientos, que reducen el aporte sedimentario a las playas y acentúan los procesos de la erosión. El resultado de estos y otros factores cambia el comportamiento de la dinámica litoral. Partiendo de esta premisa, nos hemos preguntado en otro trabajo (Navarro, 2017) qué sucede cuando la intervención humana agrava un riesgo natural y cuáles son las consecuencias que se derivan de esta actuación. ¿Es siempre la Administración responsable de indemnizar por los daños producidos ante un eventual desastre o catástrofe? ¿Qué tipo de medidas se pueden aplicar para mitigar los riesgos? ¿cómo se debe articular el sistema de responsabilidad por riesgos naturales en la costa? ¿Deben contribuir los propietarios a sufragar el coste económico de las medidas de mitigación cuando deciden convivir con el riesgo por encima de umbrales tolerables? ¿De qué manera? La temática, de gran complejidad técnica, jurídica y social, entronca con un debate más amplio: el acometimiento de políticas adaptativas frente al cambio climático basadas en la autoprotección y en la reducción de la vulnerabilidad de las edificaciones existentes.

Para la delimitación de la ZFP se tendrán en cuenta los criterios establecidos en el art. 9.2 del RDPH; entre otras, las zonas próximas a la desembocadura en el mar, pudiendo modificarse la anchura de las

zonas de protección del DPH (art. 6.2. del TRLA). La legislación de aguas es consciente de la necesidad que existe de integrar los programas de medidas que incluyen los planes de gestión del riesgo de inundaciones con la gestión del riesgo de inundaciones desde la perspectiva de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. En este sentido, existen documentos, como la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costas española que inciden en la confluencia de ambas políticas. Por su importancia estratégica, destacamos la importancia estratégica que tiene el deslinde de la zona marítimo-terrestre, a través de los estudios técnicos para fijar las olas en los mayores temporales y el período de recurrencia; la declaración de la zona en riesgo grave de regresión y las propuestas de financiación de programas para frenar los efectos de la erosión en la costa, recogidas en la legislación de costas. Así, como, en general, las medidas estructurales y con carácter adaptativo, como el estudio técnico al que obliga la legislación especial de costas, sobre los límites de la dinámica litoral.

Como hemos concluido en otros trabajos (Navarro, 2017), la intervención humana incide en la desnaturalización de los entornos costeros, así como en el cálculo de la magnitud riesgo, y degrada la capacidad de carga y de resiliencia de la costa aumentando los peligros derivados del cambio climático. Por ello, es preciso aclarar los conceptos técnicos que introduce la legislación de costas sobre los que gravita la protección frente al riesgo de inundaciones, que afectan a las poblaciones litorales.

7.3.5. Incidencia antrópica y otras actuaciones sectoriales. Remisión al sistema de responsabilidad pública

Sin duda, el carácter transversal del riesgo de inundaciones no se limita a las políticas sectoriales que venimos analizando. Dicha variable se relaciona íntimamente con otras actuaciones sectoriales a las que, por razones de espacio, no nos podemos referir en este momento. Entre ellas, destacamos los planes de desarrollo agrario, de política forestal, de infraestructuras del transporte, etc. Los artículos 15.2 y 15.3 del RD 903/2010 establecen la compatibilidad de estas políticas con el contenido que establecen los PGRI.

Este proceder se suma a otros mandatos que se contienen en el ordenamiento, a través de los cuáles se viene forzando a incluir en los diferentes instrumentos que aprueben las Comunidades autónomas mapas de riesgos naturales (inundaciones, desplazamientos de tierra, terremotos, etc.) y la realización de informes sectoriales en relación a las medidas de protección del dominio público y de las personas. Por otro lado, la alteración de los procesos naturales y de la conectividad lateral y longitudinal de cauces de los ríos produce transformaciones hidromorfológicas y altera la composición y estructura de sus masas de agua. Ello, además de generar externalidades ambientales (DMA) influye en la gestión técnica de las inundaciones, condicionando también el régimen de responsabilidad pública (Arana et. al, 2017) y el impacto que, en general, tienen sobre los asentamientos que se encuentran en terrenos aluviales contiguos a los ríos, llanos y fértiles, así como en las zonas de desembocadura de los ríos.

8. CONCLUSIONES

El fenómeno de las inundaciones responde a una evidencia fáctica: la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada. Pero esta realidad trae causa en una concurrencia de factores difíciles de predecir: precipitaciones “in situ”, escorrentías, producción de avenidas o desbordamiento de cauces, precipitaciones regulares, deshielo o fusión de nieve, obstrucción de cauces naturales o artificiales, invasión de cauces, aterramientos o dificultad de avenamiento, acción de las mareas, rotura u operación de diseño incorrecta de obras de infraestructura hidráulica, etc. La intervención humana (en muchos casos de la propia Administración pública) puede aumentar o reducir la escorrentía y determinar la evolución de las dinámicas ambientales.

La sociedad debe replantear su relación con los ríos y reconsiderar tanto la política urbanística como el

modelo de ordenación del territorio que han permitido "que se coma" terreno al río, estrangulando sus márgenes y sus zonas naturales de inundación. Una parte del trabajo ya se ha hecho, con la configuración de mapas de inundación, de peligrosidad y de vulnerabilidad. Pero es necesario partir de la inconsistencia técnica que pueden tener estos análisis debido a su necesario proceso de comprobación y validación, aún por desarrollarse. Los ciclos de revisión de los PGRI, cada seis años, deben servir para controlar la relación entre la cartografía y el Derecho, respetando los entornos naturales y favoreciendo la creación de mecanismos de retención natural del agua o la creación de zonas de inundación controladas a partir de la expansión de llanuras aluviales, que tan buenos resultados ofrece. Las infraestructuras verdes, al igual de la limpieza y mantenimiento del cauce, son alternativas deseables, pero ello no implica renunciar, *per se*, a, a la aplicación de medidas estructurales: construcción de presas y encauzamientos, diques de protección, sistemas de defensa ante subidas del nivel del mar…

En los suelos urbanizados, la intervención pública debe establecer rutas de desalojo, construir medidas de defensa, evitar la proliferación de núcleos poblacionales en zonas inundables, evitar el sellado del suelo y la modificación de la escorrentía… Las prevención y reparación de daños frente a inundaciones exige grandes desembolsos económicos. La solución pasa por crear fondos estructurales, así como un seguimiento y una fiscalización de la inversión (traducida en sistemas de rendición de cuentas, transparencia y *accountability*), fomentando también los sistemas de seguros y reaseguros, reforzando el sistema del Consorcio de Compensación de Seguros, que tan buenos resultados ha dado. El análisis coste-beneficio es crucial para lograr una mayor rentabilidad de las medidas a adoptar y concienciación social.

A nivel jurídico, son claves los procesos de convergencia e integración sectorial que se vienen produciendo. La reforma operada por el RD 638/2016 constituye un punto de inflexión para conciliar la legislación del agua y de ordenación del territorio. Las competencias autonómicas y locales siguen siendo cruciales también en este sentido. Pero las autoridades competentes cuentan, cada vez más, con informaciones técnicas, detalladas, que pueden incorporar a sus procesos de decisión. En la medida en que no lo hagan, estarán incumpliendo la normativa y serán responsables ante daños provocados por eventos catastróficos. Una cuestión que pude resultar polémica, por tanto, es la tolerancia al riesgo que cada Administración asume en sus planes de desarrollo en la aprobación de sus leyes sectoriales.

Como instrumento de cabecera, la integración que se produce entre los PGRI y los PHD es muy clara: los primeros forman parte de los segundos (art. 14.3 RD 903/2010). Ambos planes son aprobados por el Gobierno de la Nación, y, aunque en un inicio se aprobaran de forma separada, la Evaluación Ambiental Estratégica ha sido realizada conjuntamente.

Los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, por su parte, han planteado relaciones más complejas. Los mismos no podrán incluir determinaciones incompatibles con los PGRI (art. 15.1 RD 903/2010); pero estas informaciones se deben integrar (y revisar) en los propios planes de ordenación territorial y urbanística. En la medida en que no se haga, se estarán produciendo incumplimientos, pero siguen siendo los planes de ordenación territorial y urbanística los competentes para introducir esta cuestión.

El resto de planes tendrán sus propios mecanismos de adaptación. Los planes de protección civil "existentes" se adaptarán de forma coordinada (15.2 RD 903/2010) basándose en los mapas de peligrosidad y riesgo, al contenido de los PGRI. Los planes de protección civil a elaborar se redactarán de forma coordinada y mutuamente integrada a los mapas de peligrosidad y riesgo y al contenido de los PGRI. Por su parte, los planes de desarrollo agrario de política forestal, de infraestructura del transporte y demás sectores que tengan incidencia sobre las zonas inundables, deberán también ser compatibles con los PGRI (15.3 RD 903/2010). En otro orden, se deben conciliar los instrumentos técnicos de la

legislación de costas (deslinde del dominio público marítimo-terrestre, declaración de zona en riesgo grave de regresión, estudios de las dinámicas litorales) para fijar la información que estos instrumentos generen.

A nivel técnico, la creación de grupos de trabajo específicos para la coordinación e intercambio de conocimiento, así como el desarrollo de guías técnicas e Instrucciones de aplicación normativa han servido para consensuar directrices de gestión y desarrollar buenas prácticas para la gestión del riesgo de inundaciones.

Entre los desafíos a corto plazo están, realizar un proceso de adaptación al cambio climático y garantizar el cumplimiento de la Directiva Marco de aguas (en relación al riesgo de inundaciones). El análisis de datos y su traducción jurídica (en forma de cartografías de riesgos) no resulta una cuestión pacífica ni acabada. Pero es preciso trabajar con la incertidumbre de los datos teniendo en cuenta que es imposible alcanzar una protección absoluta y que no existen estándares de protección universales. Por ello, se debe partir de la realidad local e integrar la gestión de inundaciones en otros procesos de planificación, trasversalmente, coordinando el régimen de competencias.

REFERENCIAS

- AEMA (2016). *Flood risks and environmental vulnerability* (Riesgos de inundación y vulnerabilidad medioambiental). Informe 1/2016.
- Arana García, E., Conde Antequera, J., Navarro Ortega, A. y Garrido Manrique, J. (2016). El riesgo de inundación en los instrumentos normativos de planificación sectorial y ambiental. Una visión de la responsabilidad patrimonial de la administración por uso deficiente de su facultad planificadora. En: T. Navarro Caballero (Dir.), *Desafíos del Derecho de Aguas, Variables jurídicas, económicas, ambientales y de Derecho comparado*, 294-308. Monografía de la Revista Aranzadi de Derecho Ambiental.
- Aunion, J. A. (2015, dic. 11). *Más de 700.000 españoles viven en zonas de riesgo de inundación Europa obliga a elaborar mapas de peligrosidad y planes de gestión para reducir el impacto de unas catástrofes naturales que cuestan 800 millones de euros al año*. https://elpais.com/politica/2015/12/09/actualidad/1449683128_146700.html
- Berga Casafont, L. (2011). Las inundaciones en España. La nueva Directiva Europea de inundaciones. *Revista de Obras Públicas*, 3520(158), 7-18.
- Caro-Patón, I y Escartín Escudé, V. (2017). Aguas: un año clave para la gestión del riesgo de inundación en España. En: López Ramón, F. (Dir.), *Observatorio de Políticas ambientales*, 427-454. Aranzadi, Cizur Menor.
- COM (2015) 120 final de 9 de marzo de 2015 *La Directiva marco sobre el agua y la Directiva sobre inundaciones: medidas para lograr el «buen estado» de las aguas de la UE y para reducir los riesgos de inundación*. Comisión Europea.
- Comision Técnica de Inundaciones (1984). *Las inundaciones en España. Informe resumen*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- Conde Antequera, J. (2015). La responsabilidad de la Administración por daños derivados de fenómenos naturales. Especial referencia al riesgo de inundación, *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 45, 67-100.
- Consorcio de Compensación de Seguros (2014). *Estadística. Riesgos Extraordinarios. Serie 1971-2013*. Ministerio de Economía y Competitividad, Madrid.
- Díez Herrero, A. (2017). Mapas de peligrosidad y riesgo por inundaciones: implicaciones técnicas y jurídicas. En: E. Arana García (Dir.), R*iesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 165-201. Dykinson, Madrid.
- Díez-Herrero, A. y García Rodríguez, M. (2016). Riesgos por avenidas e inundaciones. En: Lario J. y Bardají, T. (Coords.), *Introducción a los riesgos geológicos*, 119-152. UNED, Madrid.

- Díez-Herrero, A. y Pujadas Ferrer, J. (2002). Los mapas de riesgos de inundaciones. En: F. J. Ayala-Carcedo y J. Olcina Cantos (Coords.), *Riesgos naturales*, 997-1012. Ariel, Barcelona.
- Escartín Escudé, V. (2016). Incidencia en el modelo de ocupación del territorio de la gestión de los riesgos de inundación. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 16, 239 (Instrumentos territoriales para la protección de la biodiversidad).
- Escartín Escudé, V. (2017). Sobre la ordenación urbanística de los terrenos inundables tras la aprobación del RD 638/2016. En: E. Arana García (Dir.), R*iesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 83-114. Dykinson, Madrid.
- Gaja, F. (2008). El "tsunami urbanizador" en el litoral mediterráneo. El ciclo de hiperproducción mobiliaria. *Scripta Nova*.
- Garrido Manrique, J. (2017). La prevención de los riesgos naturales: marco normativo y su aplicación en el planeamiento urbanístico. En: E. Arana García (Dir.), R*iesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 115-164. Dykinson, Madrid.
- Hervás Mas, J. (2020). La regularización de las edificaciones aisladas en suelo no urbanizable. Especial atención a la Ley valenciana 1/2019 de 5 de febrero. *Revista Aranzadi de Urbanismo y Edificación*, 44.
- Lauta, K. C., Albris, K, y Raju, E. (2017). La importancia de colmar las lagunas del conocimiento: un estudio sobre los nexos entre ciencia y política en relación a la reducción del riesgo de desastres en Europa. En: E. Arana García (Dir.): *Riesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 30. Dykinson, Madrid.
- Lozano Cutanda, B. y Vázquez Cobos, C. (2017). Real Decreto 638/2016: regulación de los usos y construcciones en las zonas inundables de los cauces. *Análisis GA&P*.
- Menéndez Rexach, A. (2015). Delimitación de zonas inundables. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente*, 110, 36-43.
- Menéndez Rexach, A. (2016). El derecho de aguas ante las situaciones hidrológicas extremas: inundaciones y sequías. En T. Navarro Caballero (Dir.): *Desafíos del Derecho de Aguas, Variables jurídicas, económicas, ambientales y de Derecho comparado*, 99. Monografía de la Revista Aranzadi de Derecho Ambiental.
- Menéndez Rexach, A. (2017). La integración de riesgos en la ordenación territorial y urbanística y en la planificación sectorial especial (infraestructuras críticas, protección civil y situaciones hidrológicas extremas). En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar,* 43-62. Dykinson, Madrid.
- Molina Giménez, A. (2010). La disciplina territorial del riesgo de inundaciones en el ordenamiento jurídico español. *Revista Aranzadi de Derecho Ambiental*, 18.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft Königinstrasse (2014). After de Floods. Natural catastrophes 2013 Analyses, assessments, positions. *Topics Geo*, 107. München, Germany.
- Navarro Ortega, A (2017). La alteración de la dinámica litoral fluvial y marina y su controvertido impacto en el medio: un planteamiento de revisión jurídico-administrativo de los riesgos inducidos ante el escenario de incertidumbre científica y de cambio climático. En: E. Arana García (Dir.), R*iesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 267-297. Dykinson, Madrid.
- Navarro Ortega, A (2018). De la hidronomía a la egialografía: las aguas de transición como espacio de integración jurídica y de desarrollo sostenible. En: F. J. Jiménez De Cisneros (Dir.), *Homenaje al Profesor Ángel Menéndez Rexach*. Aranzadi, Cizur Menor.
- Olcina Cantos, J. y Díez-Herrero A. (2017) Cartografía de inundaciones en España. *Revista de Estudios Geográficos*, 78, 282-284.
- Olcina Cantos, J. (2017). ¿Es la ordenación del territorio una herramienta eficaz contra el riesgo de inundaciones en España? En: E. Arana García (Dir.), *Riesgos naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 63. Dykinson, Madrid.
- Romero Aloy, M. J. (2020). Las vinculaciones singulares derivadas de la cartografía de riesgo hídrico. *Revista Aranzadi de Urbanismo y Edificación*, 44.

SEGURO DE INUNDACIÓN EN ESPAÑA: EL SEGURO DE RIESGOS EXTRAORDINARIOS

Francisco Espejo Gil
Subdirector de Estudios y Relaciones Internacionales,
Consorcio de Compensación de Seguros, España
fespejo@consorseguros.es
https://www.consorseguros.es

RESUMEN

Este artículo plantea los fundamentos del seguro y su aplicación a los riesgos de catástrofe, en particular, al de inundación. Se plantean las cuestiones más importantes que debe resolver un seguro de inundación, algunas de ellas mutuamente excluyentes, de modo que la solución final es el resultado de una serie de decisiones estratégicas y políticas, que dependen también del contexto socioeconómico e histórico. Tras una visión panorámica y sintética de las distintas opciones para el aseguramiento de este riesgo, se pasa a describir en mayor o menor detalle la situación en España, donde se aplican dos sistemas: el Seguro de Riesgos Extraordinarios, para bienes y personas, y el Seguro Agrario Combinado, para las producciones agrícolas y ganaderas. En ambas soluciones juega un papel destacado el Consorcio de Compensación de Seguros, y ambas se basan en la cooperación público-privada y la implicación del máximo número posible de actores. Por último, a partir de una revisión de las estadísticas de los últimos treinta años, se hacen una serie de reflexiones sobre la viabilidad futura del seguro de inundación, llegando a la conclusión fundamental de la necesidad de controlar la exposición y la vulnerabilidad para mantener el riesgo dentro de unos parámetros asegurables.

1. EL VALOR DEL SEGURO FRENTE AL RIESGO DE INUNDACIÓN

1.1. El seguro: principios generales

Los orígenes del seguro se pueden establecer muchos siglos atrás en la necesidad de garantizar la disponibilidad de un bien para cuya consecución se ha realizado una inversión previa: sea una cosecha, mediante la forma de una reserva de excedentes, sea el resultado de una expedición comercial, naviera, en particular. Aparecen ya dos principios que están en la base del seguro: un elemento de incertidumbre, el riesgo; y el fundamento de lo que hoy denominaríamos economía colaborativa: un colectivo expuesto a un **riesgo**, que puede hacerle incurrir en **pérdidas económicas**, lo **mutualiza** entre todos los potenciales afectados. Este es el origen secular del seguro, que, en la actualidad, facilitado por las redes sociales y las nuevas posibilidades de colaboración entre particulares, está volviendo a ponerse en práctica en algunos entornos limitados con un disfraz de modernidad.

Sin embargo, de esas prácticas ancestrales se evolucionó hacia un modelo en el que unas compañías especializadas, las aseguradoras, asumían la **transferencia de un riesgo** a determinar sobre unos **bienes, personas** o sobre la posible **pérdida de beneficios** mediante un **contrato de seguro**, formalizado mediante el pago de una **prima** del tomador a la aseguradora**.** En el caso de materializarse un riesgo sobre un bien o persona asegurada, es decir, de producirse un **siniestro**, la aseguradora indemniza esos daños, previa tasación por un perito, según las condiciones contratadas con el tomador.

El sector asegurador es hoy una parte fundamental de la estructura financiera de las sociedades desarrolladas. En España, el volumen de primas que maneja el sector supuso en 2019 el 5,2% del PIB (ICEA, 2020), esto es, el doble del peso relativo de todo el sector agrario en la economía española. Por volumen de primas, el mercado de seguros español es el decimocuarto del mundo. Si se tiene en cuenta el volumen de las inversiones del sector, este ascendió en 2019 a 319.750 millones de euros (MAPFRE Economics, 2020), lo que equivale a la cuarta parte del PIB español.

Desde un punto de vista actuarial, existen unos **principios generales para el seguro**, que son:

- Los riesgos deben ser aleatorios y presentar una frecuencia y una intensidad no excesivamente altas, que permitan que se pueda establecer una prima asequible para el tomador.
- La frecuencia y el impacto económico deben ser estadísticamente previsibles, de forma que el impacto económico del riesgo se pueda estimar correctamente y tarificar de forma adecuada. Para ello conviene tener una cierta experiencia siniestral de ese riesgo.
- Los riesgos deben ser suficientemente independientes y no presentar correlación, de forma que las aseguradoras puedan tener una cartera suficientemente diversificada, evitando cúmulos de riesgos que podrían, en caso de siniestro, comprometer su solvencia económica.

El seguro dispone de mecanismos para favorecer la asegurabilidad de los riesgos, entre los más comunes y utilizados se encuentran el **coaseguro** (en el que varias aseguradoras comparten determinados riesgos) y el **reaseguro** (por el que una aseguradora transfiere a otra entidad, reaseguradora, parte de sus riesgos, mediante un contrato y contra el pago de una prima).

1.2. El alcance del seguro

Algunos modelos económicos predicen que la competencia de los mercados facilita que todos los riesgos asegurables sean repartidos entre todos los actores mediante acuerdos mutuos para la distribución del riesgo. Sin embargo, el hecho de que a nivel mundial haya una **brecha de cobertura** para los riesgos catastróficos del orden del 70%, es decir, más de la tercera parte de los daños causados por los desastres no están asegurados (Swiss Re, 2020) revela que esos modelos no están en lo cierto. Esta discordancia grave entre teoría y realidad tiene que ver con el hecho fundamental de que para transferir un riesgo en el mercado es necesario que el comprador esté dispuesto a pagar a un precio mayor que el mínimo precio al que está dispuesto a vender, en este caso, el asegurador. Así que el límite del seguro no viene marcado por la capacidad de distribuir un riesgo, sino por el entorno socioeconómico (Gollier, 2005). Así, se matizan también los principios básicos del seguro que enunciábamos en el apartado anterior, que solo contemplan los aspectos actuariales del problema. Es decir, el hecho de que haya una oferta de seguro para un riesgo determinado no lo convierte en asegurable si el comprador no considera que contratar un seguro le aporta algún beneficio. Un bien es asegurable frente a un riesgo concreto cuando ambas partes perciben que la transferencia de ese riesgo es una transacción provechosa, e incluso esa percepción de provecho no se puede explicar exclusivamente en términos económicos, sino que hay factores sociales, históricos e incluso psicológicos que influyen sobre el grado de aversión al riesgo o el optimismo del potencial tomador y también juegan un papel relevante.

Así que, en la práctica, hay una serie de problemas y retos a los que el seguro debe enfrentarse. En primer lugar, e incluso desde el punto de vista de esos teóricos principios actuariales para poder asegurar un riesgo, los riesgos catastróficos los incumplen parcial o totalmente.

Un riesgo catastrófico puede presentar frecuencias relativamente altas, y la inundación es, como veremos, el más frecuente y recurrente Los riesgos de catástrofe pueden presentar también intensidades extraordinariamente altas. El impacto de una catástrofe sobre una acumulación de

exposiciones, con una serie casi infinita de daños directos y consecuenciales puede tener implicaciones económicas de un enorme alcance. Esta acumulación incumple también el tercer principio, el de la de independencia y no correlación, y supone un reto de primer orden para el seguro en cuanto a la capacidad financiera de los sistemas de aseguramiento de riesgos catastróficos.

El segundo principio juega también un papel fundamental para el aseguramiento de determinados riesgos poco frecuentes o cuyo periodo de retorno es difícil de establecer. Podríamos mencionar aquí los terremotos de gran intensidad, los tsunamis, accidentes nucleares graves o la pandemia, como la que desgraciadamente estamos experimentando en el momento de escribir estas líneas. La incapacidad para poder estimar los daños económicos de una siniestralidad concreta imposibilita su correcta tarificación y, por tanto, compromete también la estabilidad financiera de la solución propuesta. Es obvio que cualquier solución aseguradora debe estar concebida y aplicada como un mecanismo *ex ante*. La aplicación *ex post* de soluciones aseguradoras es completamente inviable por razones financieras y legales. Sin embargo, la mayor frecuencia de las inundaciones hace que en el caso concreto del seguro de inundación sea comparativamente más sencillo, bien a través de la experiencia siniestral, bien a través de modelos bien calibrados por esa experiencia previa, hacer una estimación económica de sus impactos.

Además, el seguro de catástrofes plantea una serie de problemas específicos. Para empezar, los **costes de transacción** son considerablemente más elevados en los riesgos catastróficos que en otros productos financieros. La peritación de los daños, con siniestros que pueden contarse por decenas o cientos de miles después de un evento, es un proceso caro y largo. Esto plantea dos inconvenientes adicionales. Uno es que estos costes suelen incluirse en la prima, por lo que los seguros de catástrofe suelen ser más caros que otros seguros equivalentes para riesgos ordinarios y el que, ante acumulaciones de siniestros de mucha importancia las aseguradoras pueden optar por hacer tasaciones menos exhaustivas o incluso aleatorias, lo que potencialmente puede suponer una mayor incidencia del fraude.

Otro aspecto relevante es la **información sobre los riesgos**. Para que un sistema de seguro funcione adecuadamente no solo deberían asegurarse las personas o bienes que están en el extremo más alto de la exposición a ese riesgo, porque se podría presentar un problema de **antiselección o selección adversa**, en el que las aseguradoras se encontrarían con carteras con altísima exposición y pocas probabilidades de compensar aquellas exposiciones con un nivel de riesgo más alto con otras de menor exposición. Hay varias formas de abordar este problema: una de ellas es recurrir al coaseguro y al reaseguro, cuya función en este caso sería asegurar una mayor diversificación de la cartera más que aportar mayor solidez financiera. Otra es introducir, desde el punto de vista de la regulación, algún grado de obligatoriedad en el seguro: bien haciendo obligatorio el aseguramiento, bien introduciendo la obligatoriedad de complementar un producto financiero más común (un seguro del hogar o una hipoteca, por ejemplo) con un seguro de catástrofes. Así, la obligatoriedad de extender un seguro de catástrofe a toda la masa asegurada reduce significativamente la selección adversa. Esta medida es aún más eficaz cuando afecta a más de un riesgo (por ejemplo, la inundación o el terremoto), puesto que las zonas de exposición más alta a un riesgo dado no tienen por qué coincidir con las de exposición más alta a otro, haciendo así más eficaz la distribución del riesgo.

Sin embargo, la obligatoriedad del seguro, de una forma u otra, suele aplicarse con tarifas que no reflejan el nivel concreto de un riesgo dado en una ubicación determinada, por lo que se reduce la capacidad potencial del seguro como elemento indicador e incentivador de la reducción del riesgo. Este hecho, además, podría exacerbar el denominado **riesgo moral**, por el que el asegurado, por el mero hecho de serlo, reduciría su proactividad a la hora de reducir su exposición y vulnerabilidad frente a un riesgo. Igualmente, aparte de la aplicación de tarifas que reflejen el nivel del riesgo, hay otras medidas aplicables para reducir este riesgo moral, en particular la aplicación de franquicias.

Las opciones de seguro de catástrofe que sí reflejan el nivel de riesgo en la prima del seguro presentan, no obstante, el problema de la **asequibilidad**, y suelen tener una penetración, incluso en zonas de riesgo, notablemente inferior a los sistemas en los que se prima la mayor mutualización de los riesgos.

En definitiva, la cuestión del aseguramiento de riesgos catastróficos dista de ser un asunto trivial, comprende cuestiones económicas, sociales, estratégicas e incluso morales de gran complejidad. Sin embargo, el seguro es, probablemente, el medio más eficaz, rápido y cierto para la indemnización y la recuperación de los daños causados por las catástrofes, entre las que la inundación es la más frecuente, por lo que trataremos a continuación del valor del seguro de inundación.

1.3. El valor del seguro de inundación

El seguro ha experimentado una evolución, pasando de ser un elemento estrictamente compensatorio de unos daños a un elemento más de la cadena de la gestión del riesgo de inundación.

En primer lugar, naturalmente, el seguro sigue siendo por encima de todo un elemento por el que se garantiza la compensación por un daño. Al establecerse un contrato de seguro entre el tomador y el asegurador existe seguridad jurídica y garantía de que en el caso en el que se produzcan unos daños causados, en este caso, por inundación, esos daños, que pueden ser sobre la propiedad, personales o la pérdida de beneficios producida por la interrupción de la actividad consecuencial a los daños producidos.



Figura 1. Ejemplo de localización de daños de inundación.
Fuente: Consorcio de Compensación de Seguros (CCS, en adelante).

Pero, además, el seguro puede desempeñar más funciones de gran importancia en la reducción del riesgo. Para empezar, es probablemente la fuente más fiable para la conocer los daños que causan las inundaciones. Las aseguradoras tasan los daños para estimar la indemnización, y la recopilación de todos estos datos puede formar tanto bases estadísticas a lo largo del tiempo como componer una información muy detallada sobre el alcance e intensidad de un episodio de inundación determinado (Fig. 1). Esta información es fundamental para obtener estimaciones de daños por inundación, que puedan servir tanto como base para los futuros escenarios de cambio climático, como para hacer estimaciones de coste-beneficio sobre las distintas opciones disponibles para la reducción del riesgo, o también para el calibrado de modelos, tanto para la delimitación de zonas inundables como para la estimación de daños derivados de eventos extremos o con mayores periodos de retorno.

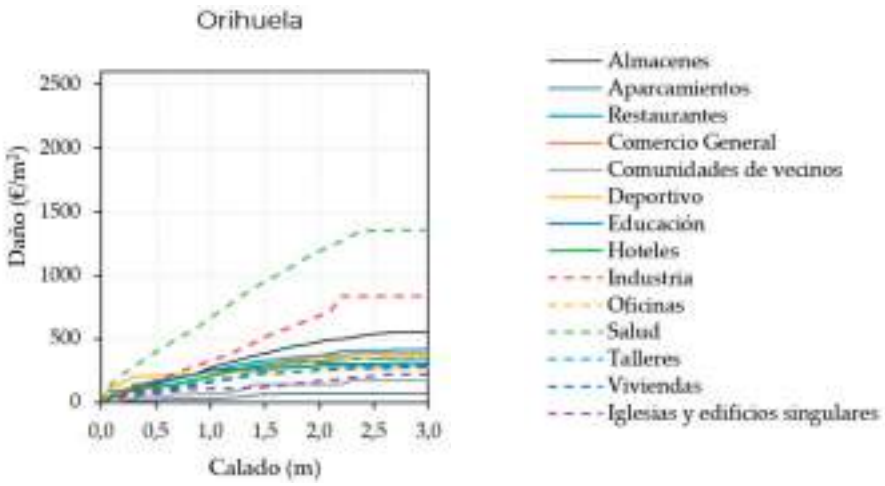


Figura 2. Ejemplo de uso de bases de datos de daños asegurados y experiencia siniestral para la estimación de curvas de daño en diversos tipos de exposición en Orihuela (Alicante). Fuente: Martínez Gomáriz et al. (2020)

También, como se ha indicado anteriormente, el seguro puede ser un instrumento que, a través de la prima o de las franquicias, sirva para incentivar que el asegurado adopte medidas de reducción del riesgo de inundación.

Por todo ello, son innumerables los ejemplos en los que las aseguradoras cooperan con las administraciones, el sector académico y técnico-científico en todo tipo de acciones y proyectos encaminados a un mejor conocimiento y delimitación de los riesgos, a la toma de conciencia de todos los actores relacionados con o afectados por las inundaciones, o al establecimiento de políticas más eficaces y, en definitiva, orientadas a la reducción de riesgos de desastre.

Desde un punto de vista meramente financiero, el seguro es un mecanismo que permite aliviar y proteger los presupuestos públicos. Un seguro de inundación bien diseñado posibilita que los recursos públicos vayan destinados más eficientemente a la adopción de medidas de control, gestión y reducción del riesgo, más allá de la mera indemnización de los daños. Actuando de forma coordinada, la cooperación público-privada en este campo permite una gestión más eficiente de los recursos, así como la participación de todos los actores, empezando por el acto responsable de contratar un seguro para proteger un bien expuesto a un riesgo.

2. OPCIONES PARA EL ASEGURAMIENTO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Todas las cuestiones planteadas en el apartado 1 de este trabajo hacen pensar que las opciones para asegurar los daños producidos por las inundaciones sean prácticamente tan diversas como el número de jurisdicciones en las que éstas son de aplicación (CCS, 2008). Las opciones para indemnizar los daños abarcan desde no recurrir al seguro y que la administración indemnice directamente los daños a opciones de seguro completamente privadas.

El mejor ejemplo de lo primero probablemente sean los Países Bajos, donde en principio el estado se hace cargo directamente de cualquier daño sin mediar contratos de seguro, puesto que se entiende que es la responsabilidad de la administración mantener en buen estado unas infraestructuras fundamentales para mantener a salvo de inundaciones un país que en buena parte está por debajo del nivel medio del mar. Esta intervención de las administraciones en forma de subvenciones o indemnizaciones está presente en la mayor parte de las jurisdicciones, si bien es importante delimitar

bien el alcance de las subvenciones públicas y de las indemnizaciones del seguro para controlar el denominado *charity hazard* o riesgo benéfico. Este riesgo consiste en que las ayudas públicas suponen un desincentivo para la contratación de seguros de catástrofe, puesto que los potenciales afectados confían en que "alguien" indemnizará sus daños sin necesidad de invertir unos recursos en la contratación de un seguro. Cuando las reglas del juego están claras, cual es el caso de los Países Bajos, o de los países que condicionan las ayudas adicionales a la contratación previa de una póliza de seguro, esto no es un problema, pero en la mayoría de los casos el ámbito de la intervención pública en la indemnización directa no está claramente definido, es variable y dependiente de las circunstancias (económicas, sociales, electorales, etc.), lo que genera a la larga menor penetración del seguro, inseguridad jurídica y discrecionalidad.

Las soluciones puramente aseguradoras pueden, como se ha dicho, ser enormemente variables y han sido objeto de numerosos estudios comparados (OECD, 2016; DG CLIMA-IVM-Ramboll, 2017; Jarzabkowski et al., 2018). Haciendo una generalización muy grosera, un extremo de las opciones estaría formado por la cobertura completamente privada del riesgo, en el que las entidades aseguradoras privadas proporcionan seguros de inundación, de contratación facultativa, que se reaseguran igualmente en el mercado privado. El otro extremo estaría formado por seguros prestados por entidades públicas o que actúan por cuenta de las administraciones públicas, que pueden llegar a ser obligatorios o de contratación obligatoria.

El extremo completamente privado del rango de posibilidades refleja el riesgo concreto en la prima y aplican rebajas condicionadas a la adopción de medidas de reducción del riesgo, por lo que desde este punto de vista son las soluciones con más potencial para la reducción de daños. Sin embargo, su principal problema es que el coste de estas primas es entre dos y tres órdenes de magnitud superior a las primas de los seguros del otro extremo, con lo que la contratación de este tipo de seguros tiene una penetración muy baja, en países desarrollados puede ser inferior al 20% incluso en zonas bien definidas como inundables (Swiss Re, 2019). Así, cuando se produce un evento importante, el estado suele verse forzado a intervenir compensando daños que quedan sin cubrir perjudicando, según el riesgo benéfico descrito, el propio desarrollo del mercado de seguros y dedicando a la reconstrucción fondos que podrían haber estado destinados a la prevención.

Buen funcionamiento	Mal funcionamiento
En una misma póliza se combinan varios riesgos hidrometeorológicos extremos.	Los diferentes riesgos hidrometeorológicos extremos se aseguran por separado.
La adquisición de un seguro para riesgos hidrometeorológicos extremos está vinculada a un tipo de producto de uso más generalizado o que sea obligatorio (p.ej. hipotecas, seguro de incendio…).	No hay un requerimiento legal, o este es laxo, para el aseguramiento.
Hay colaboración entre los sectores público y privado, con un objetivo común claramente definido, con separación de roles.	En general, la baja penetración del seguro.
Existe un cuadro de coaseguro o de reaseguro público que cubra los daños catastróficos.	La población espera que haya ayudas públicas directas para los daños causados por los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Tabla 1. Resumen de características que causan el buen o mal funcionamiento del seguro de bienes frente a los riesgos hidrometeorológicos. Fuente: DG CLIMA-IVM-Ramboll (2017)

El otro enfoque pasa por una intervención de la administración, en mayor o menor grado, para facilitar que haya una oferta de seguro de inundación universal y asequible. La forma de esta intervención puede ir desde la mera obligatoriedad de contratar un seguro (que puede ser ofertado por el sector privado o por el público) a crear entidades públicas o que actúan por cuenta de las administraciones públicas para proporcionar seguros de inundación. La contratación de estos seguros puede ser completamente opcional, ser la extensión obligatoria de seguros de otro tipo, o ser estrictamente obligatoria. Estas entidades pueden ser aseguradoras o meras administradoras de cuadros de coaseguro de entidades privadas que pueden a su vez reasegurarse en el sector privado. También pueden ser reaseguradoras públicas que reaseguran a las aseguradoras privadas, o cuadros de correaseguro privado gestionados por una entidad pública que reaseguran a las entidades privadas. Algunas de estas aseguradoras o reaseguradoras pueden contar además con la garantía del estado, que se hará cargo de los daños asegurados por encima de un determinado nivel, superior a la solvencia de estas entidades especializadas. En definitiva, las opciones son muchas, pero todas ellas tienen la característica común de que, en general, presentan un menor rendimiento a la hora de dar una indicación del nivel de riesgo en la prima y, por tanto, de su capacidad de actuar directamente como un elemento que incentive la reducción del riesgo, pero son en general mucho más efectivas a la hora de obtener una mayor penetración, reduciendo así la brecha de cobertura, puesto que el coste para el asegurado es sensiblemente inferior. La Tabla 1 resume las principales características en cuanto a su buen o mal funcionamiento de las distintas soluciones aseguradoras de bienes para los riesgos hidrometeorológicos en Europa, conclusiones de un estudio específico y comparativo realizado por la Comisión Europea. No obstante, hay que decir que las distintas soluciones aseguradoras son el resultado de una serie de circunstancias políticas, históricas y socioeconómicas y que cada mercado está adaptado a la suya en mayor o menor grado.

Hay otras opciones para la cobertura aseguradora que van más allá del esquema póliza-tasación-compensación. Una de ellas son los seguros paramétricos, en los que se produce una indemnización que está contratada de antemano cuando se supera un umbral previamente definido. Por ejemplo, por encima de determinado nivel de agua en un bien asegurado se realiza un pago, sin necesidad de tasación de los daños (ni, estrictamente, de que se hayan producido daños). Los parámetros de este tipo de seguros pueden ser la precipitación, el caudal de un curso fluvial, o un nivel de aforo concreto. También puede funcionar por defecto, por ejemplo, se pueden producir pérdidas económicas por falta de producción eléctrica en una central cuando el caudal es insuficiente para generar electricidad o para refrigerar los sistemas.

Otra opción son los bonos de catástrofe, donde determinados inversores “apuestan” unos fondos a que se produzca o no un determinado evento catastrófico, por ejemplo, un huracán de intensidad superior a 3 en Florida en un año dado. Si dicho evento no se produce, los inversores recuperan su inversión con un interés, y si se produce, los fondos se utilizan para pagar las compensaciones del seguro. Se trata de elementos de financiación relacionados con el seguro (*insurance-linked securities*) que presentan un elevado atractivo financiero por estar completamente desvinculados de los ciclos económicos y que, particularmente para eventos de muy alto impacto y clara identificación y delimitación, juegan un papel crecientemente importante.

3. EL SEGURO DE INUNDACIÓN EN ESPAÑA

España es un caso bastante particular a nivel mundial en el tratamiento de los riesgos catastróficos, entre ellos el riesgo más frecuente y costoso de nuestro país: la inundación. En la Tabla 2 se hace un resumen de las formas en las que el seguro cubre los riesgos naturales en España.

Peligros que afectan a bienes y personas	Cobertura aseguradora
Efectos directos de la precipitación (lluvia, nieve, granizo) Vientos fuertes (<120 km/h) Aludes y deslizamientos del terreno Incendio forestal	**Seguro ordinario** Las compañías aseguradoras privadas cubren estos riesgos, que tarifican libremente.
Inundación (fluvial, pluvial y costera) Vientos fuertes (>120 km/h y tornado) Terremoto y maremoto Erupción volcánica Meteoritos	**Seguro de riesgos extraordinarios** Extensión obligatoria de las pólizas suscritas por las aseguradoras privadas para cubrir estos riesgos, cuya cobertura se presta subsidiariamente por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS).
Peligros que afectan a la agricultura y ganadería	
Inundación Sequía Vientos fuertes Helada y olas de calor Granizo Incendio Plagas, etc.	**Seguro agrario combinado** Sistema de cobertura basado en un cuadro de coaseguro de compañías aseguradoras privadas y el CCS, gestionado por una entidad privada (Agroseguro), con el CCS como reasegurador. Los asegurados disponen de subvenciones públicas (estatales y autonómicas) para el pago de parte de las primas.

Tabla 2. La cobertura aseguradora de los peligros naturales en España.
Fuente: elaboración propia.

3.1. El seguro de riesgos extraordinarios

3.1.1. Características generales

En España, es obligatorio extender la cobertura de las pólizas de seguros de bienes, de vida y accidentes y de pérdida de beneficios para cubrir los denominados "riesgos extraordinarios". Estos riesgos extraordinarios pueden ser naturales: la inundación (fluvial, pluvial y costera, incluyendo el embate de mar), los vientos fuertes (superiores a 120 km/h, coincidencia de vientos superiores a 96 km/h y precipitación superior a 40 mm/h, o tornados: la denominada legalmente "tempestad ciclónica atípica"), el terremoto y maremoto, la erupción volcánica y la caída de meteoritos y otros cuerpos siderales de origen natural procedentes del exterior de la atmósfera terrestre. Otros riesgos extraordinarios también pueden ser los causados por de determinados hechos violentos de naturaleza político-social como el terrorismo, el motín, sedición y tumulto popular, así como los daños producidos por las fuerzas armadas y las fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado en tiempo de paz.

La primera conclusión de importancia es que no todos los riesgos naturales son riesgos extraordinarios. Hay daños producidos por peligros naturales, como cualquier daño directo causado por la precipitación (incluyendo el granizo), que no están incluidos dentro del seguro de riesgos extraordinarios y que se gestionan completamente por parte del sector asegurador privado.

La cobertura de los riesgos extraordinarios viene regulada por el Reglamento del Seguro de Riesgos Extraordinarios (R.D. 300/2004, de 20 de febrero), donde se requiere legalmente la extensión de la cobertura de estos riesgos a la mayoría de los contratos de seguro. Solamente quedan excluidos los seguros para naves (marítimas y aéreas), los de responsabilidad civil, los de construcción y los de transporte, así como los seguros agrarios que, como veremos, tienen un tratamiento específico.

La cobertura de estos riesgos se puede prestar, conjuntamente o por separado para alguno de ellos, por la entidad privada con la que se contrata la póliza original. Si no es así, que es el caso prácticamente general, la cobertura se presta de forma subsidiaria por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS). Para la prestación de esta cobertura se aplica un recargo sobre estas pólizas que se calcula por un porcentaje del valor asegurado, no sobre la prima, para que no haya diferencias producidas por las distintas tarifas de cada aseguradora, y que depende del ramo del seguro (bienes, vida y accidentes o pérdida de beneficios), del bien asegurado (viviendas, comercios, industrias, etc.). Por ejemplo, el recargo de riesgos extraordinarios para una vivienda es del 0,07‰ del capital asegurado, de modo que al seguro de una vivienda asegurada por 200.000 € se le aplicará un recargo de riesgos extraordinarios de 14 € sobre su póliza anual de multirriesgo del hogar, robo o incendio. En el caso de los vehículos el recargo es una cantidad fija que depende de su clase. Las entidades aseguradoras que emiten las pólizas cobran el recargo conjuntamente con sus primas y transfieren posteriormente el recargo al CCS, reteniendo un 5% en concepto de gastos de tramitación. Esto quiere decir que la tarifa no depende del nivel de riesgo concreto. El seguro de riesgos extraordinarios hace una aproximación inversa al problema: en muchos sistemas de seguros de catástrofe se crea un *pool* de entidades aseguradoras para cubrir un riesgo difícil, como por ejemplo la inundación. En el caso español se crea un *pool* de riesgos, que se gestiona por una sola entidad, con una tarifa plana que se calcula globalmente pero donde las zonas con una exposición más alta a un peligro determinado pueden compensarse con las que tienen mayor exposición a otro. Al tratarse de riesgos muy diferentes entre sí, como la inundación, el terremoto o los actos terroristas, no hay correlación entre los mismos y esta compensación puede darse.

Con todos los recargos el CCS constituye una reserva de estabilización que permite hacer frente al pago de las indemnizaciones. En general, la ratio combinada es del 58,42 % (CCS, 2020), lo que quiere decir que, de media, se ingresa más prima de la que se consume y esa cantidad excedente, después del pago de los correspondientes impuestos, se aporta a la reserva, que actúa como un amortiguador interanual para hacer frente a eventos de elevada intensidad y baja frecuencia sin que haya necesidad de modificar las tarifas con frecuencia, como sí sucede en el mercado global de reaseguro.

El seguro de riesgos extraordinarios cuenta con la garantía del Estado para que, en el caso poco probable de que esta reserva no fuese suficiente, se pudiera seguir haciendo frente a las indemnizaciones.

CLASE DE RIESGO	Nº de Pólizas	%	Capitales Asegurados	%	Capitales Asegurados Medios
Viviendas y Comunidades de Propietarios de Viviendas	19.628.912	37,8	3.737.564.527.445	64,3	190.411
Oficinas	275.397	0,5	172.815.296.689	3,0	627.513
Resto: Comerciales, Industriales y otros	3.790.365	7,3	1.892.335.825.377	32,6	499.249
Obras Civiles	139	0,0	7.658.636.508	0,1	55.098.104
Vehículos Automóviles	28.274.846	54,4	-	-	-
TOTAL	**51.969.659**	**100**	**5.810.374.286.020**	**100**	**245.217**



Figura 3. Número de pólizas, capitales asegurados y capitales asegurados medios según clase de riesgo en el seguro de bienes para riesgos extraordinarios en 2019. Fuente: Estadística de Riesgos Extraordinarios. Serie 1971-2019 (CCS, 2020)

Así que otras dos conclusiones fundamentales son que el seguro de riesgos extraordinarios cubre exclusivamente a bienes y personas previamente aseguradas y que el CCS no emite pólizas para riesgos extraordinarios. Las pólizas se contratan en el sector asegurador privado y el CCS cubre automáticamente los daños producidos por los riesgos extraordinarios especificados en la ley a los bienes y personas asegurados previamente, en las mismas condiciones y por los mismos importes contratados en la póliza original. Esto implica que, *de facto*, para la inmensa mayoría de las pólizas contratadas en España existe una cobertura dual: una ordinaria de la que se encarga la aseguradora de la elección del asegurado y otra extraordinaria que cubre el CCS para riesgos como la inundación.

La cobertura es automática y no requiere de ningún tipo de declaración de zona especialmente afectada por desastres. Por ejemplo, si se produce una inundación que haya producido daños sobre un bien asegurado, de forma independiente del origen de esa inundación, siempre que sea natural (desbordamiento de un río, una escorrentía producida por una precipitación intensa o por efecto del oleaje o del aumento local del nivel del mar) y de la intensidad o extensión de la misma, se considerará un riesgo extraordinario y será el CCS quien perite y pague los daños directamente al asegurado (por lo cual el CCS es un asegurador directo y no una entidad de reaseguro en lo relativo a los riesgos extraordinarios). El asegurado puede dar parte de los daños bien a su aseguradora original, que remitirá el expediente al CCS, o bien directamente al CCS. Para bienes considerados de uso personal (viviendas y vehículos) y en el caso de daños personales, el CCS no aplica ninguna franquicia. En el caso de bienes comerciales, industriales o infraestructuras, el CCS aplica una franquicia del 7 % de los daños producidos y para los seguros de pérdida de beneficios se aplican las franquicias estipuladas en la póliza contratada con la entidad original.

En el caso de daños personales, el seguro de riesgos extraordinarios cubre a los asegurados en España en cualquier parte del mundo. Es decir, si un asegurado español sufre heridas como consecuencia de una inundación en cualquier parte del mundo, esos daños serán compensados por el CCS. Es muy poco común que los seguros de catástrofe cubran daños personales. En España se cubren, y además se hace extensiva esta cobertura a todo el planeta.

En definitiva, España dispone de un sistema robusto, universal y prácticamente automático, para la cobertura aseguradora de las inundaciones, que a menudo es citado y puesto como ejemplo de

cooperación público privada y de mecanismo válido para la adaptación al cambio climático (Poljanšek et al., 2017). La penetración del seguro de inundación en España es del orden del 72 % para viviendas (Unespa, 2020) o de la totalidad del parque automovilístico, pues la cobertura está vinculada al seguro obligatorio del automóvil, lo que supone que la penetración total del seguro de riesgos extraordinarios y, por tanto, de inundación, para España sea del orden del 62,1 % (OECD, 2020), prácticamente el doble de la media mundial. La principal fuente de la brecha de cobertura remanente son las infraestructuras que, aunque pueden asegurarse (el sistema no hace ninguna diferencia entre bienes de titularidad pública o privada), normalmente no lo están (Figura 3), puesto que el Estado se autoasegura y los daños producidos en este tipo de bienes suelen ser muy costosos.

3.1.2. El Consorcio de Compensación de Seguros

El CCS es una Entidad Pública Empresarial adscrita al Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. Sus orígenes más remotos están en la posguerra civil más inmediata, cuando se establecieron una serie de consorcios de seguros para hacer frente a los enormes daños producidos por la contienda. No obstante, muy pronto esta solución, originalmente temporal y creada con aquel propósito específico, se comenzó a utilizar para cubrir daños catastróficos como el incendio de Santander y otros episodios de gran impacto en los años 40 del s. XX. De modo que en 1954 se creó la figura permanente del Consorcio de Compensación de Seguros como entidad pública que daba cobertura a los riesgos extraordinarios. De este modo, el Seguro de Riesgos Extraordinarios tiene una antigüedad de 66 años, lo que es otra de sus características: el sistema está totalmente asimilado al sector asegurador español desde hace varias generaciones y existe una simbiosis entre el sector público y el privado, pues ambos son fundamentales para el buen funcionamiento del sistema, que tiene una clara atribución de roles y competencias.

El Consejo de Administración del CCS está compuesto por 7 directivos de entidades aseguradoras privadas y 7 altos funcionarios de la administración pública, y su presidente es el Director General de Seguros y Fondos de Pensiones. Así, el CCS ocupa una posición intermedia entre el sector asegurador privado y público, pero también entre los asegurados y los riesgos y entre los riesgos y todas las entidades y administraciones competentes en su estudio, gestión, prevención y reducción. Nunca se subraya lo suficiente la conveniencia que supone que para hablar de riesgos como la inundación, el sector académico o las entidades de cuenca, por citar algún ejemplo, solo tengan que hablar con un interlocutor, el CCS, para obtener datos de daños o establecer algún tipo de colaboración, y a la recíproca, que todo el sector asegurador pueda hablar, a través del CCS, con todas las partes interesadas en el conocimiento y gestión de estos riesgos.

El CCS realiza otras funciones muy diversas para dar apoyo al sector asegurador además del seguro de riesgos extraordinarios. Entre ellas están determinadas funciones en el seguro obligatorio de automóviles, en los seguros agrarios combinados (que se tratarán seguidamente), en la liquidación y saneamiento de entidades aseguradoras, en los seguros de crédito, nucleares y de responsabilidad medioambiental, por citar algunas.

3.1.3. Algunas estadísticas

Las figuras 4 y 5 muestran con claridad que la inundación supone el riesgo más importante tanto por la cuantía de los daños como por su frecuencia y recurrencia. El 71 % del total de los daños indemnizados es por causa de este riesgo. En la figura 4 también se aprecia el carácter absolutamente extraordinario del año 2019, en el que las inundaciones producidas por una sucesión de eventos en la segunda mitad del año elevaron la composición relativa de los daños causados por este riesgo al 97 % del total. Dentro de estos eventos destacó especialmente el producido por la DANA de septiembre de 2019, que con 56.552 reclamaciones ha sido el evento de inundación con más solicitudes de indemnización en la historia del CCS, y con un coste para el seguro de riesgos extraordinarios de 479,6 millones de euros ha sido el 4º evento más caro en la historia del seguro de riesgos

extraordinarios y la segunda inundación más cara, solo después de las inundaciones del País Vasco de agosto de 1983, que con unas indemnizaciones que hoy se elevarían a 846 millones de euros siguen siendo el evento más caro en la historia del CCS (CCS, 2020).

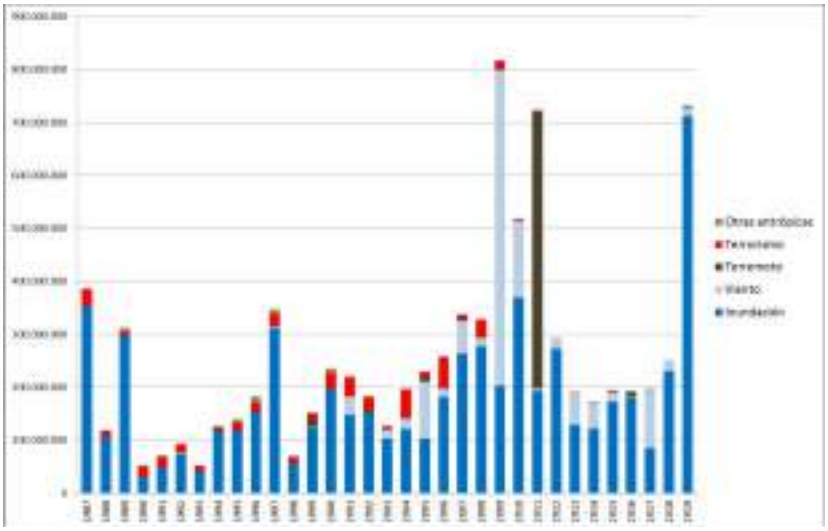


Figura 4. Composición anual de las indemnizaciones por riesgos extraordinarios según causa 1987-2019. Fuente: CCS, elaboración propia.

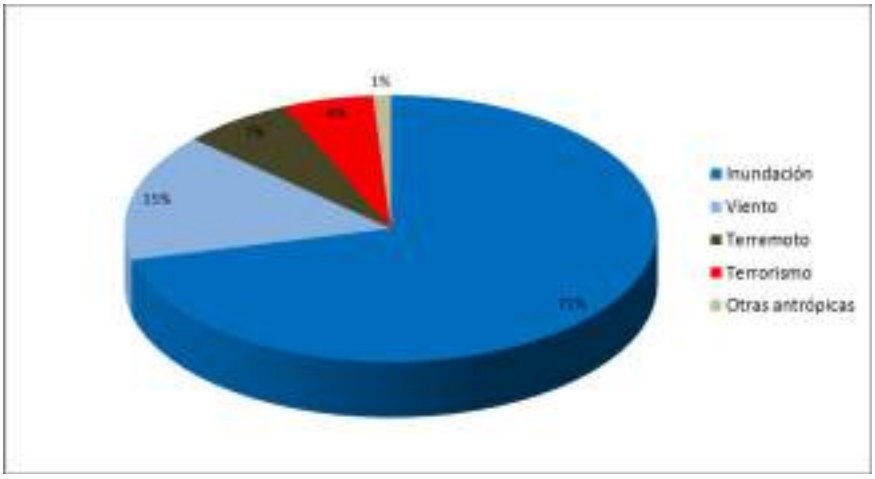


Figura 5. Composición agregada de las indemnizaciones por riesgos extraordinarios según causa, 1987-2019. Fuente: CCS, elaboración propia.

3.2. El seguro agrario combinado

La cobertura aseguradora de los daños producidos sobre bienes agrícolas y ganaderos tiene, como lo refleja la Tabla 2, un tratamiento diferente. Huelga comentar que en un país con una climatología tan compleja como España asegurar la producción agraria es, a la vez, una necesidad económica –y social- básica y un reto de enormes proporciones. Por eso, el modelo de Seguro Agrario Combinado (SAC) español, que ha cumplido este año su 40 aniversario, es una referencia internacional, pues proporciona cobertura potencial para prácticamente todas las producciones agrarias, cubriéndolas para un abanico muy amplio de riesgos hidrometeorológicos (inundación, granizo, viento…) y climáticos (sequía, olas de frío y calor, incendio…), mediante otro modelo de cooperación público-privada que involucra a todos los actores interesados (productores, administraciones estatal y autonómica, sector asegurador privado y público).

El SAC es un seguro voluntario, cuya única condición es que, si un productor se asegura, debe asegurar todas las producciones similares de su propiedad con el fin de controlar la selección adversa. Las primas del seguro agrario se diferencian entre las líneas viables (aquellas con una menor exposición teórica al riesgo) y las experimentales (con mayor exposición teórica al riesgo) y tienen en cuenta, por tanto, tanto la exposición al riesgo como las medidas de reducción del riesgo que adopta el productor. Las primas del SAC están subvencionadas por las administraciones públicas (tanto la estatal como las autonómicas) y el nivel de subvención es del orden del 45 % de la prima.

El seguro agrario lo presta un cuadro de coaseguro formado por algo más de una veintena (la composición varía de año en año) de entidades aseguradoras privadas, que toman partes variables del riesgo, más el CCS, que tiene una cuota de participación en el cuadro del 10 %. El seguro se puede contratar en cualquiera de las entidades privadas que forman parte del cuadro de coaseguro y existe una entidad gestora privada, Agroseguro, que gestiona el cuadro y se encarga de la tramitación de los siniestros, peritaciones e indemnizaciones. En casos en los que la siniestralidad excede un nivel determinado de daños, entra en juego el reaseguro del CCS, que compensa estas pérdidas. Para ello, se aplica un recargo específico sobre las primas del seguro, que alimenta otra reserva de estabilización específica para esta actividad.
La penetración global de este seguro -voluntario, recordemos- es ligeramente inferior al 30 % de toda la producción agraria. Puede parecer escasa, aunque en el contexto de los seguros agrarios de nuestro entorno es relativamente elevada, con unas 400.000 pólizas contratadas en 2019, asegurando a 5,83 millones de ha por un valor de 14.167 millones de euros (Agroseguro, 2020). Además, esta penetración es muy variable según las producciones, siendo muy alta en árboles frutales y, en general, para producciones de alto valor, como hortalizas o viñedo. En los últimos años, las indemnizaciones totales del seguro agrario se sitúan alrededor de los 700 millones de euros anuales, que es más del doble de la media anual de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios (Figura 4), lo que da una idea de la importancia de este seguro y del impacto de los riesgos que cubre.

Aunque el ejercicio de disociar las causas de los siniestros agrarios sea muy complejo, porque las causas suelen agruparse o incluso ser consecuenciales, las que tienen mayor incidencia son las climatológicas, en particular sequías y heladas y, dentro de las hidrometeorológicas, el granizo. No obstante, la inundación es un riesgo importante para el seguro agrario (Machetti, 2019) y solo en el episodio de la DANA de septiembre de 2019 se produjeron daños por un importe de 84 millones de euros (aunque los efectos de la inundación se unieron a los de otras adversidades como el granizo, el viento fuerte o la precipitación intensa sobre los cultivos).

3.3. Perspectivas futuras de los seguros de inundación en España

A nadie se le escapa que, como para todas las demás actividades humanas, el cambio climático está suponiendo y va a suponer un reto muy importante. Por supuesto, también para los sistemas que aseguran las catástrofes. Solo en el seguro de riesgos extraordinarios se puede comprobar que el 86 % del total de los daños está producido por riesgos hidrometeorológicos (Figura 5) que, por lo tanto, son susceptibles de verse afectados por el cambio climático. En el seguro agrario, donde se combinan riesgos hidrometeorológicos con riesgos climatológicos, el impacto podría ser aún mayor.

No hay, sin embargo, que olvidar el peso de la exposición en la tendencia de los daños. En España, en las últimas décadas, se ha producido un aumento tanto de la exposición física (Olcina Cantos et al., 2017) como de la penetración del seguro de bienes para los riesgos extraordinarios, número de pólizas y del capital asegurado, que han pasado a ser entre 1990 y 2019, de 15 a 50 millones y de 1,5 a 5,8 billones de euros, respectivamente (CCS, 2020). Es decir, la exposición asegurada se ha multiplicado en los últimos 30 años en un factor que está entre 3 y 4.

Si nos fijamos en la evolución del número de expedientes y de las cantidades indemnizadas por daños

en los bienes en el seguro de riesgos extraordinarios por inundación (Figuras 6 y 7), veremos que hay un comportamiento similar, aunque con matices. En el caso de la inundación, el número de solicitudes de indemnización (expedientes) se multiplica por un factor de entre 4 y 5, mientras que los daños se multiplican por un factor de alrededor de 3.

La síntesis de ambos efectos se aprecia en la Figura 8, que refleja los costes medios por expediente y año a lo largo de esta última treintena, con una clara tendencia a reducirse. En 2019, los daños producidos en los bienes asegurados son del orden de la mitad de que en 1990. Esto puede deberse a una mejor gestión y concienciación del riesgo –ciertamente ha habido aspectos como la capacidad de predicción y la gestión de las emergencias y las inundaciones que han mejorado sensiblemente-, a que con la mayor difusión y penetración del seguro ahora se aseguren bienes menos costosos que hace 30 años, o a una combinación de ambas causas.

También hay que destacar que en estos últimos años esa bajada tiende a estabilizarse, con lo que podría pensarse que el potencial de reducción del riesgo con las medidas actuales ha alcanzado todo su potencial. Ciertamente, el año 2019 ha sido tan extraordinario en cuanto a los enormes daños producidos que habrá que esperar algún tiempo más antes de poder afirmar con más rigor si estamos ante un cambio de tendencia o es el efecto de un año tan singular.

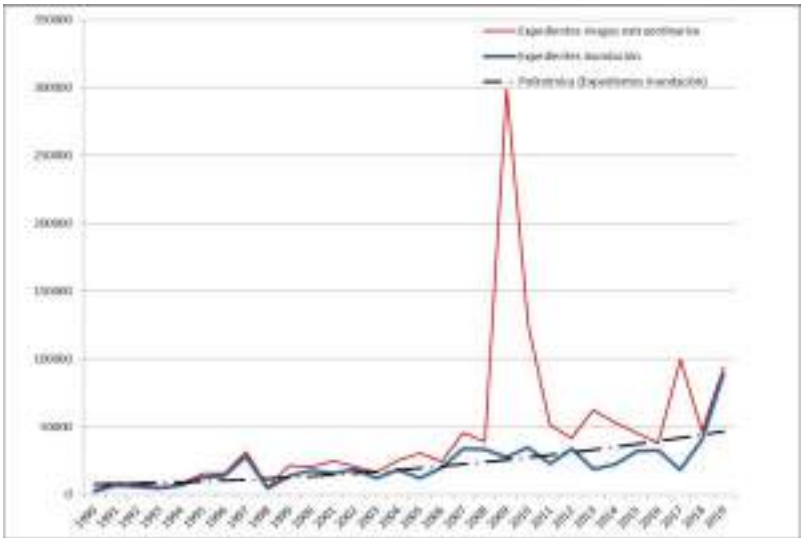


Figura 6. Número anual de expedientes por daños en los bienes para el total de riesgos extraordinarios y por inundación (1990-2019). Fuente: CCS, elaboración propia.



Figura 7. Montante total de indemnizaciones por daños en los bienes para el total de riesgos extraordinarios y por inundación (1990-2019), en millones de euros actualizados a 31.12.19. Fuente: CCS, elaboración propia.

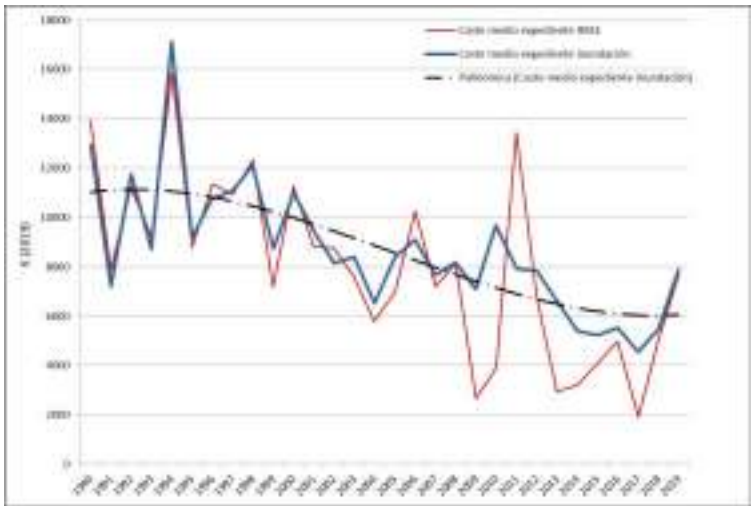


Figura 8. Coste medio por expediente por daños en los bienes para el total de riesgos extraordinarios y por inundación (1990-2019), en euros actualizados a 31.12.19. Fuente: CCS, elaboración propia.

Lo que parece cierto es que todos los escenarios de cambio climático apuntan a un escenario de mayor torrencialidad de las precipitaciones, combinado con mayor duración de periodos secos y con una evaporación mayor, con lo que habrá una merma de la disponibilidad hídrica. En resumen, es posible que los cursos fluviales lleven menos caudal medio, pero el riesgo de inundación parece que no va a disminuir, sino más bien al contrario (MITECO, 2018). Es decir, si el peligro va a aumentar, se hará cada vez más imperativo actuar con rigor y energía para controlar tanto la exposición como la vulnerabilidad. En primer lugar, por la elemental necesidad de reducir daños y sufrimiento y en segundo, para procurar que unos sistemas de seguro de inundación que están entre los mejores del mundo sigan siendo viables.

Bien cierto es que, en el caso del seguro de riesgos extraordinarios, el hecho de que su escala sea el de toda la masa asegurada del país, gracias a la obligatoriedad de la extensión de la cobertura, facilita la sostenibilidad del sistema, pues su capacidad va en paralelo con la exposición. El sistema tiene otras características importantes para su adaptación, como son la incorporación en su proceso de todos

los actores públicos y privados relevantes o su flexibilidad, existiendo la posibilidad de modificar tarifas, riesgos o umbrales de cobertura. Pero, aun así, ante aumentos muy drásticos y sostenidos de la peligrosidad, la única opción viable para controlar el riesgo ha de pasar por actuar de manera más proactiva sobre la exposición y la vulnerabilidad. Para ello, la colaboración que el CCS mantiene con todas las entidades sectoriales y concernidas en el conocimiento y gestión del riesgo deberá mantenerse y, si cabe, reforzarse.

REFERENCIAS

- Agroseguro (2020). *Informe anual 2019*. Agroseguro, Madrid.
- CCS (2008). *La cobertura aseguradora de las catástrofes naturales. Diversidad de sistemas.* Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- CCS (2020). *Estadística de riesgos extraordinarios. Serie 1971-2019.* Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- DG-CLIMA, IVM, Ramboll (2017), Insurance of weather and climate-related disaster risk. Inventory and analysis of mechanisms to support damage prevention in the EU. European Commission, Bruselas.
- Gollier, C. (2005). Some aspects of the Economics of Catastrophe Risk Insurance. En: OECD *Catastrophic Risks and Insurance,* Policy Issues in Insurance, 8, 13-30.
- ICEA (2020). *Anuario del Sector Asegurador 2019*. ICEA, Madrid.
- Jarzabkowksi, P., Chalkias, K., Cacciatori, E. y Bednarek, R. (2018). Between State and Market: Protection Gap Entities and Catastrophic Risk. Cass Business School, City University of London, Londres.
- Machetti, I. (2019). El riesgo de inundación en la agricultura. En *Consorseguros Digital,* 11. Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- MAPFRE Economics (2020). *El mercado español de seguros en 2019.* Fundación MAPFRE, Madrid.
- Martínez Gomáriz, E., Guerrero Hidalga, M., Forero Ortiz, E., Castán, S., Velasco Droguet, S. y Villanueva Blasco, A. (2020). Inundaciones pluviales en zonas urbanas españolas: un modelo de estimación de daños basado en la experiencia pericial. En *Consorseguros Digital,* 12. Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- MITECO (2018). *Inundaciones y cambio climático*. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- Y OECD (2016). *Financial Management of Flood Risk.* OECD, París.
- OECD (2020). *Responding to the COVID-19 and pandemic protection gap in insurance.* OECD, París.
- Olcina Cantos, J., Pérez Morales, A., Rico Amorós, A.M., Gil Guirado, S. y López Martínez, F. (2017). La importancia de la vulnerabilidad y la exposición en el aumento del riesgo de inundaciones del litoral mediterráneo. En *Consorseguros Digital,* 7. Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- Poljanšek, K., Marín Ferrer, M., De Groeve, T. y Clark. I. (Eds.) (2017). *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less.* Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Swiss Re (2019). Natural catastrophes and man-made disasters: 1990-2018 (dataset). *Swiss Re Sigma*, 2, 2019.
- Swiss Re (2020). Catástrofes naturales en tiempos de acumulación económica y riesgos climáticos. *Swiss Re Sigma*, 2, 2020.
- Unespa (2020). *El seguro en los hogares. Encuesta de presupuestos familiares 2018. Ine.* Estamos Seguros, Unespa.

LA COMUNICACIÓN, UN PILAR FUNDAMENTAL EN LA GESTIÓN DE RIESGOS NATURALES

Fermín Crespo Rodríguez
Socio Director de Comunicación de ATAMA Estrategia Responsable
fermincrespo@atama.global

RESUMEN

La comunicación juega un papel cada vez más relevante en la prevención, en la gestión y en la atención a los afectados por catástrofes naturales en todo el mundo. Un uso adecuado de los protocolos de información y de los canales de comunicación son cuestiones clave para reducir la pérdida de vidas humanas y disminuir el altísimo coste económico que producen las catástrofes de origen natural cada año. Los avances tecnológicos unidos a la universalización de la telefonía móvil, del uso de internet y de las redes sociales, permiten transmitir y recibir mensajes que aceleran la toma de decisiones, amortiguan las situaciones de incertidumbre, reducen las pérdidas y generan tranquilidad en las personas que han sufrido las consecuencias de forma directa y en la sociedad en general. La facilidad de acceso a la información y a ser informador también abre la posibilidad de que se publiquen *fake news* que generan alarma y distorsionan la realidad. Además, los periodistas que cubren estos extraordinarios sucesos viven en el difícil equilibrio entre contar con ética y profesionalidad la realidad o caer en la tentación de optar por información sensacionalista para incrementar su notoriedad, el tráfico en sus webs y las interacciones de los usuarios.

1. EL IMPACTO DE LA COMUNICACIÓN EN LAS CATASTROFES NATURALES

Las catástrofes naturales, además de un gran impacto social y emocional, tienen un elevado coste económico, como evidencian algunos datos que ha hecho públicos recientemente la aseguradora alemana Munich Re (Ponce de León, 2020): en la última década se han contabilizado en el mundo más de 8.800 catástrofes naturales, que han provocado 425.000 muertes y unas pérdidas que solo en 2019 alcanzaron los 135.000 millones de euros, cifra que se multiplicaría en el dato acumulado desde 2010.

Algunas cifras referentes a la evolución del número de víctimas mortales en los últimos treinta años refrendan la importancia de la comunicación en la gestión de los desastres. En 1991 más de 100.000 personas murieron en Bangladesh al paso de un ciclón, dos décadas más tarde los desastres naturales causaron 317.000 muertos, mientras que se contabilizaron 235.000 en 2008 y 240.000 cuatro años antes. Por el contrario, en 2019 fueron unas 10.000 personas las fallecidas. De hecho, desde 2011 el número de muertos por catástrofes naturales no ha rebasado los 31.000 anuales, según las cifras de la Base de Datos Internacional de Desastres de la Universidad Católica de Lovaina.

Los especialistas de Munich Re también han estudiado el calentamiento global desde la década de 1970 y han constatado una tendencia al incremento del número de catástrofes naturales en todo el mundo. Desde la multiplicación de los tifones y ciclones en Asia hasta el aumento de las tormentas eléctricas en Norteamérica y Europa, acompañadas de granizo, tornados e inundaciones. Esta circunstancia va a provocar que los costes económicos aumenten en los próximos años conforme se aceleren estos fenómenos por el agravamiento del cambio climático.

Steven Bowen (INESE, 2018), director de Impact Forecasting y meteorólogo, afirma que los riesgos catastróficos están en un proceso de evolución constante y que la compleja combinación de factores socioeconómicos, cambios de población y exposición en las localizaciones vulnerables, así como un clima cambiante que se traduce en unos modelos climáticos más volátiles, están promoviendo debates sobre cómo gestionar la necesidad de implantar medidas de mitigación y resiliencia. Es obvio que siempre se van a producir desastres naturales, la diferencia la marcará cómo esté la sociedad preparada para afrontarlos, este será el factor de diferencia que marque las futuras pérdidas que se deriven de los mismos.

Estos impactantes datos generan investigaciones permanentes en la búsqueda de sistemas para predecirlos, prevenirlos y cómo gestionarlos de la forma más adecuada. Es evidente que cada vez son menos los muertos en los desastres naturales, y una de las causas por las que se produce esa reducción es la mejoría generalizada en los sistemas de comunicación.

La respuesta inmediata a los desastres naturales plantea grandes desafíos a quienes los padecen, pero también a quienes los gestionan. Administraciones e instituciones tienen que afrontar, en un escenario siempre crítico, la evacuación y rescate de personas, pero también deben dar respuesta a las necesidades de los afectados: traslados, construcción de instalaciones para refugios, suministros (agua, alimentos, ropa, medicamentos, etc). En este marco definido por el caos es vital disponer y compartir, en tiempo real y de forma eficaz y eficiente, sistemas de comunicación con todos los datos precisos para priorizar las acciones y remitir la ayuda a los lugares prioritarios.

1.1. Un factor crítico

La comunicación es un factor crítico en la gestión de la crisis provocada por un desastre natural. El autor Newson Doug (1988) expone cinco constantes habituales en estas situaciones:

- La gente conoce la crisis a través de las redes interpersonales y se preocupa más en función de la proximidad geográfica;
- La gente tiende a basar la seriedad de la crisis en términos de riesgo y ésta depende de la opinión oficial y pública sobre lo que es un riesgo;
- Las fuentes más confiables son, por lo general, las gubernamentales;
- La intensidad y constancia en la cobertura de los medios indica al público la importancia de la crisis;
- La transparencia y la información abierta reduce los rumores y la incertidumbre.

A lo que suma cinco dificultades que tienen que superar los medios de comunicación sociales para informar sobre una crisis:

- Los periodistas buscan simbolizar la crisis para hacerla dramática y memorable a la audiencia;
- La crisis generalmente interrumpe los canales normales de comunicación;
- Los medios tienden a buscar información principalmente de fuentes oficiales que en ocasiones pueden no estar preparados;
- La gestion de la crisis puede ocupar a la fuente de tal forma que no puedan satisfacer las peticiones de información de los medios;
- En ocasiones la crisis es una amenaza para una organización, lo que puede ser un factor limitativo del flujo de información.

1.2. No hay comunicación eficaz sin estrategia

Para conseguir una buena gestión de la comunicación en un contexto de excepcionalidad marcado por una catástrofe natural, es necesario generar un marco de trabajo en el que son claves estos factores:

- La identificación de colaboradores, aliados, las fuentes y los públicos a los que hay que dirigir la comunicación.

- La creación de un equipo que se encargue de las comunicaciones públicas con funciones definidas en caso de un evento de desastre.
- El establecimiento de argumentarios genéricos y específicos.
- La identificación y entrenamiento de portavoces para responder rápidamente a los medios de comunicación.
- La elaboración de propuestas específicas para la difusión de información y para la movilización social.
- El establecimiento de criterios técnicos con especialistas y autoridades para determinar la información que se debe divulgar.
- La transparencia en los mensajes desde el primer anuncio dentro de las primeras 24 horas que siguen a la confirmación de la crisis.
- Actualización de los canales de información con la comunidad y los medios de comunicación como sitios web, redes sociales, conferencias de prensa, emisiones y entrevistas, etc.

1.3. Proceso para definir una estrategia adecuada

La elaboración de estrategias de comunicación ante situaciones de riesgos naturales es la plataforma desde la que se definen, planifican y preparan las actividades para cada una de las etapas de una emergencia. Es necesario planificar una estrategia adecuada de comunicación de riesgos, que según Brennan & Gutierrez (2011), tiene cinco etapas:

- **Preparación**
  Se definen las bases para establecer puentes de comunicación entre la población y las autoridades, y se define el equipo de comunicación de riesgos, y se planifican las medidas de respuesta para los escenarios que se ha previsto atender durante la evolución de la emergencia identificada.
- **Inicio**
  Definición de la información a compartir con la población afectada por el desastre y a la sociedad en general bajo premisas de sencillez, credibilidad, veracidad, congruencia y transparencia. Es un momento crucial porque la gestión adecuada puede evitar la ansiedad, el caos, el pánico o reacciones que pueden empeorar la situación de partida. Además, es previsible un interés muy intenso por parte de los periodistas que van a cubrir la noticia.
- **Control**
  La comunicación se debe centrar en la difusión de mensajes claves para la población, en especial para la más afectada o vulnerable, para reforzar los mensajes de prevención. Es importante corregir los rumores o las informaciones incorrectas. Los objetivos de la comunicación de riesgos deben estar centrados en ayudar a la población a entender de manera adecuada sus propios riesgos para que pueda tomar las decisiones apropiadas y oportunas.
- **Recuperación**
  Es el momento de abordar con mayor precisión las causas que originaron el evento y los probables nuevos riesgos que puedan surgir de manera inmediata o colateral (por ejemplo, una segunda ola de eventos), con el fin de procurar asimilar los conocimientos y lograr cambios de comportamientos sostenidos.
  En este punto es vital identificar los aspectos que hacen vulnerables a la población o a los bienes afectados, con el fin de evitarlos, corregirlos o incluso eliminarlos completamente.
- **Evaluación**
  Permite valorar la eficacia en la ejecución del plan de comunicación en cada etapa de la estrategia, el desempeño del equipo de comunicación de riesgos, así como la documentación y sistematización de lo aprendido para determinar los aspectos fundamentales que deben mejorarse en la estrategia de comunicación de riesgos.

La etapa de evaluación permite entonces efectuar una auditoría de las actividades internas del equipo y del proceso de comunicación con la población. La evaluación comprende la conceptualización, el diseño, la ejecución y la utilidad de las intervenciones de la comunicación de riesgos.

2. INFORMACIÓN Y SENSACIONALISMO

Los desastres naturales son situaciones imprevistas que producen la necesidad de acceso a información, al tiempo que condicionan el flujo de la misma por el entorno caótico e inesperado que generan. Por tanto, la cobertura mediática se ve dificultada por las circunstancias del entorno, por la incertidumbre y por las dificultades para acceder a las fuentes principales, inmersas en la resolución de problemas y en la toma de decisiones. La incidencia del periodismo puede ser muy positiva en la respuesta humanitaria o en la canalización de fondos. No obstante, su trabajo permite que, en tiempo real, estén conectados afectados, testigos, profesionales, instituciones, Administración y operativos de salvamento y tengan la oportunidad de ofrecer datos actualizados al resto de la ciudadanía, pero también mensajes de solidaridad, consejos y recomendaciones.

El periodista vive en un difícil equilibrio para dar fe de una realidad sin caer en el morbo. Debe asumir una responsabilidad social ante las consecuencias del desastre; más allá de su función informativa, le corresponden una serie de funciones sociales en medio de la crisis, que resultan cruciales para el rescate y salvamento de personas afectadas.

Los periodistas cubren, en un primer momento, los aspectos más obvios sin alcanzar el grado de profundidad informativa y aportar las claves que demanda la sociedad. En este sentido, una reciente investigación (Lozano Ascencio et al., 2017) pone de manifiesto que, en un buen número de ocasiones, las informaciones periodísticas sobre catástrofes naturales carecen del necesario rigor, puesto que no tienen en cuenta las causas y las consecuencias.

Para este equipo investigador los reporteros se centran sobre todo en cuestiones que tienen que ver con el sensacionalismo, en difundir imágenes impactantes y conmovedoras y, muy pocas veces, ofrecen datos técnicos relevantes o de ayuda humanitaria, que sirvan para dar información a la sociedad y tengan un carácter preventivo para difundir la cultura del riesgo.

Esto se debe, según los expertos, a una falta de especialización y de preparación en estas materias, agravadas por la reducción de las plantillas que sufren los medios de comunicación (Tendencias 21, 2015) desde hace años y en que muchas veces se cuenta como corresponsal con alguien que no tiene la suficiente experiencia ni conoce los protocolos oportunos. Además, cuando pasan unos días desde el inicio de la catástrofe, los periodistas se van y el acontecimiento va perdiendo protagonismo en los medios hasta caer en el olvido, como ocurrió en Haití.

Algunos estudios llevados a cabo sobre la labor de los periodistas en situaciones de crisis como, el realizado por Pellegrini et al. (2015) “La calidad periodística en caso de desastres naturales: cobertura televisiva de un terremoto en Chile”, confirman que el primer día de la catástrofe hay una cobertura muy intensa, centrada en la alta vulnerabilidad e incertidumbre en la ciudadanía; mientras que en los días posteriores va disminuyendo progresivamente la atención y la importancia en los medios para recuperar paulatinamente la normalidad. En cuanto a la jerarquía de los temas abordados, la primera jornada se da prioridad a los temas de mayor urgencia (como la falta de transporte, la destrucción de construcciones e infraestructura, la existencia de víctimas, …) y a aquellos sobre el desastre en sí mismo. A partir del segundo día, los medios aumentan su atención sobre las tendencias sociales, con especial cobertura a las historias humanas y a las acciones de ayuda a los afectados.

Con el paso de los días no se produce un análisis más profundo de las consecuencias sociales y económicas de la catástrofe con temáticas que habrían potenciado la calidad de la cobertura informativa. Tampoco se buscan fuentes más especializadas y expertas que permitan asignar un sentido informativo más profundo a los hechos relatados.

Señalan, desde el punto de vista del tratamiento ético de la información audiovisual, que las informaciones se centran en historias que por sí mismas conllevan una alta carga emocional trágica, a las que se aplican técnicas de comunicación que potencian dicha condición y en las que se introducen un alto promedio de adjetivos calificativos valorativos, con un exceso de opinión y de especulación.

Esta línea informativa se ha traducido en una tendencia percibida por la población de
que el periodismo tiende a recurrir a la exacerbación de las emociones y el dolor en circunstancias de catástrofes.

2.1. Recomendaciones para informar sobre tragedias

Para evitar estas situaciones, en el XVII Laboratorio de Periodismo de la Asociación de la Prensa de Madrid (APM), celebrado el 7 de mayo de 2015 sobre "Tragedias y periodistas en la era digital" (Federación de Asociaciones de Periodistas de España, 2015), varios expertos debatieron sobre las transformaciones de la cobertura de tragedias y catástrofes y las exigencias que imponen la implantación de las redes sociales y las nuevas tecnologías. En dicha mesa de trabajo definieron una lista de recomendaciones para informar sobre tragedias en la era digital:

- Es imprescindible redoblar la atención a las reglas tradicionales del periodismo ante el cambio radical del escenario de la comunicación producido por la implantación de las redes sociales y las nuevas tecnologías.
- Pese a las exigencias de inmediatez, los errores proceden de la falta de verificación, rigor y precisión. El contraste de fuentes sigue siendo una exigencia primordial y, ante la sobreinformación, la capacidad para distinguir cuáles son fiables es trascendental.
- La prudencia debe subyacer ante las prisas inherentes a lo digital por informar de inmediato. El rumor y la especulación en los casos de tragedias y catástrofes no se convierten en noticia hasta que lo confirmen fuentes oficiales.
- Los periodistas deben extremar su compromiso ético para distinguir fehacientemente qué deben contar, cuándo y cómo.
- Los periodistas deben respetar el espacio y el dolor de las víctimas y sus familiares, solo acceder a ellos con su consentimiento previo y actuar con empatía a la hora de relacionarse e informar. Hay que tener siempre en cuenta que las víctimas son las grandes perjudicadas.
- Solo se deben ofrecer imágenes impactantes cuando aporten información y valor añadido. No es aceptable emitir repetidamente en bucle las imágenes de las víctimas. Nunca hay que olvidar que detrás de las catástrofes hay personas.
- Hay que respetar el enfoque de género en las imágenes con que se ilustran las desgracias, ya que suelen aparecer más mujeres que hombres, acentuando este hecho el cliché de la debilidad femenina.
- Los periodistas deben extremar el cuidado y repensar si es conveniente la publicación de información sensible en las redes sociales. Hay que tener en cuenta que esa información puede ser valiosa para los terroristas.
- La coordinación entre los portavoces de las autoridades y los periodistas para despejar bulos en las redes sociales es fundamental.
- Se debe exigir la máxima transparencia a las autoridades a la hora de transmitir información.
- Los gabinetes de prensa de las distintas autoridades deben liderar el proceso informativo y hacer frente a la incertidumbre de la ausencia de información sobre la tragedia.

- Hace falta una mayor autocrítica entre los periodistas: pese a que los errores en los sitios webs se pueden corregir, durante el tiempo que han estado publicados son susceptibles de dañar a algún ciudadano.

2.2. Los desastres naturales, un terreno abonado para las fake news

Las situaciones de crisis como los desastres naturales son un terreno muy propicio para la difusión de noticias falsas, aprovechando los momentos de desorientación general, la vulnerabilidad de los afectados y la sensibilidad de la sociedad ante cualquier información trascendente. Los autores, en muchos casos bots, aprovechan el escenario propicio, cargado de emotividad, para darle la máxima difusión a sus invenciones vestidas de verdad, que acaban generando confusión.

Comenta Javier Villamizar (2019) en su columna "Fake News ¿hasta cuándo?" que la información falsa llega más más lejos, más rápido y amplia que la verdad en todas las categorías de información. Un estudio del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), afirma que mientras que la verdad rara vez se difunde a más de 1.000 personas, un 1% de las noticias falsas más virales se difunde rutinariamente entre 1.000 y 100.000 personas. Para conseguirlo ponen en marcha programas informáticos al servicio de la intoxicación informativa. De esta forma consiguen que la gente dé por cierta cualquier información que se asemeje a una nota informativa y que la gente la comparta, bien porque está cerca de nuestras creencias o sencillamente porque lo comparte alguien que está en nuestro círculo más cercano.

La proliferación de estos bulos ha llevado a empresas como Google, Twitter y Facebook a dedicar departamentos técnicos, dotados con cuantiosos recursos humanos y económicos, para intentar controlar las fake news aplicando sistemas de inteligencia artificial.

En la lucha contra la información falsa (Vargas, 2019) también actúan los llamados Virtual Operation Support Teams (VOST), que operan en España coordinados como Asociación Nacional de Voluntarios Digitales de Emergencias, cuyo objetivo es difundir información útil y veraz en situaciones críticas, y contrarrestar el efecto de la desinformación.

En situaciones críticas es conveniente seguir en internet las instituciones oficiales que gestionan e informan sobre los desastres naturales. Su nivel de cobertura es fidedigno y sus cuentas en redes sociales suelen estar verificadas. En situaciones críticas (Expansión mx, 2018) es importante analizar detenidamente la información antes de compartirla.

3. REDES SOCIALES Y DESASTRES NATURALES

Una pieza fundamental en la creciente efectividad de las estrategias para alertar, limitar los efectos de los desastres naturales y facilitar su gestión ,es la generación de un sistema estable de comunicación, basado en las redes sociales con más impacto (Twitter y Facebook fundamentalmente, y en menor medida Instagram), que mantenga el contacto permanente entre las distintas administraciones, las instituciones, los equipos humanitarios que trabajan sobre el terreno y los afectados por la catástrofe.

En su efectividad tienen un papel fundamental los más de 7.300 millones de smartphones que hay en el mundo y los más de 3.000 millones de personas que utilizan en el mundo redes sociales, muchas de ellas con perfiles en más de una. La inmediatez que proporcionan, la bidireccionalidad de la información y su utilidad incluso cuando colapsan los sistemas tradicionales de comunicación, las han convertido en el medio de información más global que existe. En menos de una década se han erigido en el medio de conexión vital para los ciudadanos, las ONG, las Administraciones y los medios de comunicación en situaciones de emergencia.

El terremoto de Haití fue uno de los primeros escenarios críticos en los que las redes sociales jugaron un papel relevante. La organización Médicos sin Fronteras utilizó Twitter con la etiqueta #MSF para concentrar todas las colaboraciones que recibían. De igual manera, en Twitter se posicionó la etiqueta #HelpHaiti para encontrar información, hacer seguimiento de la situación y colaborar. Además, se podía conseguir información a través de #Haiti o #Earthquake.

En este sentido, en España, las cuentas oficiales de las instituciones que se dedican a las emergencias son los referentes más eficaces en situaciones de crisis. Así, en función de la catástrofe es oportuno acudir a los perfiles operativos de Bomberos, Protección Civil, el 112, los cuerpos policiales, la Unidad Militar de Emergencias o la Agencia Estatal de Meteorología, entre otros. También otras organizaciones sociales cuentan con perfiles específicos para la comunicación en situaciones de emergencia como Cruz Roja Española.

En 2015 Facebook puso en marcha una función denominada Safety Check, que permite a todas las personas afectadas por un desastre natural informar a sus familiares y amigos de su estado. Esta opción detecta la ubicación del usuario y le pregunta si se encuentra a salvo o no. Con tan solo presionar el botón que aparece en pantalla, se publicará un mensaje automáticamente en la biografía de la persona en el que se pueden incluir comentarios sobre la situación de la persona. Esta herramienta también incluye la herramienta Facebook Fundraisers para contribuir a la recaudación de fondos, algo que resulta vital en situaciones de crisis, facilitando que la gente haga donaciones a un fondo de recaudación para apoyar las acciones de asistencia a los damnificados.

La edición digital del Diario El País recogía en un artículo las conclusiones de un estudio de la revista Science Advances, en el que se confirma una relación directa entre la intensidad de la actividad en Twitter y la gravedad con la que impacta un desastre natural en un territorio. Con esta información se puede mejor la toma de decisiones sobre cómo distribuir mejor el envío de los equipos de rescate y las acciones de ayuda. La herramienta, además, permite hacer una estimación del coste económico (Abad Liñán, 2016) del daño al poco de ocurrir.

El estudio se centró en la evolución del huracán Sandy, que azotó la Costa Este de Estados Unidos y Canadá en 2012, y comprobaron que se publicaban más tuits en las zonas que luego se confirmó que habían sido más afectadas. Según los investigadores, la información permite dibujar mapas muy detallados, descendiendo incluso al nivel de los códigos postales y que la metodología es útil para distintos entornos y en el impacto de distintos desastres.

3.1. Redes sociales especializadas en luchar contra las inundaciones

Un equipo de investigadores europeos, fundamentalmente italianos y españoles, ha desarrollado un prototipo de herramienta de previsión e información basado en la inteligencia artificial denominado Social Media for Flood Risk (SMFR), capaz de analizar e integrar las publicaciones realizadas en Twitter, en más de 27 idiomas, en las fuentes con las que trabaja el European Flood Awareness System (EFAS), una organización cuyo objetivo principal es adoptar medidas preventivas ante futuros episodios de inundaciones, la catástrofe natural que más pérdidas económicas genera en la UE.

Este sistema aporta una metodología que genera modelos sobre episodios de inundaciones y las características del terreno, mientras que de forma paralela genera datos de primera mano que aportan testigos y medios de comunicación locales, lo que reduce a la mínima expresión los tiempos de respuesta y mejora la eficacia de la intervención.

El sistema está diseñado para combinar las predicciones hidrometeorológicas con el seguimiento automático e inmediato de los tuits publicados sobre la inundación, lo que permite acortar la respuesta en situaciones de crisis por este tipo de desastre natural. Cuando el EFAS identifica una zona que tiene

riesgo de inundación, de forma automática el sistema SMFR comienza su labor de recopilación de publicaciones en Twitter de usuarios de la zona afectada.

En una prueba piloto realizada durante las inundaciones en Calabria (Italia), del 2 al 5 de octubre de 2018, la herramienta recopiló con éxito 14.347 tuits durante tres días, los clasificó por relevancia y proporcionó datos de localización geográfica.

3.2. Diseños de apps para luchar contra los desastres naturales

Desde 2019 se puede descargar en Google Play la primera aplicación europea gratuita denominada I-REACT, fruto del proyecto europeo del mismo nombre, destinado a desarrollar herramientas tecnológicas útiles para prevenir y mejorar la respuesta en situaciones de catástrofes naturales, con el objetivo de crear entornos más seguros y disminuir el impacto humano y económico. La propuesta, que todavía está en proceso de mejora en cuestiones como la usabilidad, propone a los ciudadanos que participen activamente en la detección y comunicación de desastres como inundaciones, incendios, seísmos y otros eventos meteorológicos extraordinarios. De esta forma se puede hacer un seguimiento de la situación medioambiental y aportar información precisa sobre los efectos en las infraestructuras, en las comunicaciones e incluso permite dar información de refugios seguros durante las emergencias.

Cualquier persona puede darse de alta en la aplicación y subir información geolocalizada e imágenes de cualquier suceso o validar la información subida a esta herramienta por otros usuarios para que todo el mundo pueda disponer de información más veraz y actualizada. Esta app permite evitar bulos y noticias falsas, puesto que, además, analiza constantemente informaciones publicadas en Twitter en tiempo real para trasladar a los usuarios de las situaciones peligrosas que ocurren en su entorno. La app incluye también consejos y una pequeña trivia con preguntas sobre qué hacer antes, durante y después de una emergencia meteorológica.

Este proyecto además ha desarrollado tecnologías como una plataforma de ‘Big Data’ para predecir mejor los desastres, tecnología sensorial, gafas inteligentes para que los equipos de respuesta a emergencias puedan recibir y enviar información sin usar las manos y un sistema de apoyo para mejorar la toma de decisiones durante emergencias.

Como si de una especie de red social se tratase, la información puede ser contrastada por el resto de usuarios.

Además, la app proporciona información a los usuarios de cómo actuar en los distintos tipos de desastres naturales como inundaciones, incendios o terremotos.

I-REACT (Martínez, 2018) también incluye mapas de riesgo, que permiten al usuario estar informado constantemente de la posibilidad de que ocurra alguna catástrofe en su ubicación. "Queremos que la información sobre desastres sea lo más accesible posible y esto significa que debemos poder acceder a ella desde nuestros móviles. Esto contribuirá a aumentar nuestra seguridad, salvar vidas y a reducir los daños causados por las catástrofes naturales”, agrega Dominici.

En México, en el año 2017, el Colegio de Ingenieros Civiles de México puso en marcha la app denominada Rescate Responsable (Pixel, 2017), una aplicación destinada a recoger información sobre los daños estructurales que tienen las viviendas como consecuencia de un desastre natural, en este caso el sismo que aconteció el 19 de septiembre. La herramienta admite que se suban datos de identificación, localización GPS e imágenes en las que se visualicen los daños que han sufrido las edificaciones. Las fotografías las analizan un equipo de especialistas que deciden si es preciso mandar equipos de apoyo y rescate.

REFERENCIAS

- Abad Liñán, J. M. (11 de 03 de 2016). Twitter sabe antes que nadie cuánto cuestan las catástrofes. *El País*. https://elpais.com/tecnologia/2016/03/11/actualidad/1457704699_399299.html
- Brennan, B. & Gutierrez, V. (2011). *Guía para elaborar la estrategia de comunicación de riesgos.* OPS/OMS, Washington, DC, EE UU.
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2020). *Fallecidos por riegos naturales en España en 2019.* Informes DGPCE.
- Domínguez-Panamá, J. J. (2017). El periodismo de desastre: de las no-rutinas a las funciones sociales del periodista. *Comhumanitas: revista científica de comunicación, 1*(8), 103-115.
- Doug, N. (1988). Comunicación, crisis y desastres naturales. *Chasqui. Revista Latinoamericana de Comunicación*, 54-56.
- Expansión mx. (05 de 04 de 2018). ¿Por qué las noticias falsas se propagan más rápido que las verdaderas? https://expansion.mx/tendencias/2018/04/05/por-que-las-noticias-falsas-se-disipan-mas-rapido-que-las-verdaderas
- Federación de Asociaciones de Periodistas de España. (08 de 05 de 2015). *Decálogo de recomendaciones para informar sobre tragedias en la era digital.* https://fape.es/decalogo-de-recomendaciones-para-informar-sobre-tragedias-en-la-era-digital/
- INESE, R. (26 de Julio de 2018). *https://www.inese.es/*. Obtenido de https://www.inese.es/las-perdidas-aseguradas-causadas-por-los-desastres-naturales-alcanzan-los-21-000-millones-de-dolares/
- Lozano Ascencio, Carlos, Sánchez Calero, M. Luisa & Morales Corral, Enrique. (2017). *Periodismo de riesgo y catástrofes.* Fragua.
- Martínez, E. G. (13 de 10 de 2018). Nace la primera app que permite a los ciudadanos luchar contra los desastres naturales. *Idealista News*. https://www.idealista.com/news/finanzas/tecnologia/2018/10/12/768664-dia-internacional-para-la-reduccion-de-los-desastres-2018-la-primera-app-europea-que
- Organización Panamericana de la Salud. (2009). *Gestión de la Información y Comunicación en emergencias y desastres: Guía para equipos de respuesta.*
- Pellegrini, S., Puente, S. & Grassau, D. (13 de 10 de 2015). La calidad periodística en caso de desastres naturales: cobertura televisiva de un terremoto en Chile. *Estudios Sobre El Mensaje Periodístico*, 249-267. U. C. Madrid Ed., Madrid. https://revistas.ucm.es/index.php/ESMP/article/view/50678
- Pixel, M. (22 de 09 de 2017). Rescate Responsable, la aplicación para reportar daños estructurales en nuestra vivienda. *Xataca México*. https://www.xataka.com.mx/aplicaciones/rescate-responsable-la-aplicacion-para-reportar-danos-estructurales-en-nuestra-vivienda
- Ponce de León, M. (11 de Enero de 2020). Las catástrofes naturales pasan una factura de 47.000 millones al seguro mundial en 2019. *Expansión*. https://www.expansion.com/empresas/2020/01/11/5e1a0be4e5fdea4f228b4613.html
- Tendencias 21. (04 de 05 de 2015). *Tendencias21* . https://tendencias21.levante-emv.com/las-catastrofes-naturales-son-maltratadas-por-los-medios-de-comunicacion_a40346.html
- Torres Pérez, J. E. (2015). T*endencias sobre catástrofes en los países de la Cuenca del Mediterráneo. Evicencias sobre la difrenciación social en la meterialización del riesgo (1900-2014)*. Trabajo Final de Grado, Universidad de Murcia, Murcia.
- Vargas, M. (19 de 09 de 2019). Breve manual para detectar noticias falsas en desastres naturales. (Spondeomedia, Ed.) *Spondeomedia*. https://spondeomedia.com/breve-manual-para-detectar-noticias-falsas-en-desastres-naturales/?cn-reloaded=1
- Villamizar, J. (19 de 10 de 2019). Fake News: ¿Hasta cuándo? *LR La República*. https://www.larepublica.co/analisis/javier-villamizar-500031/fake-news-hasta-cuando-2922654

VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN A LAS INUNDACIONES EN ESPACIOS TURÍSTICOS DEL LITORAL MEDITERRÁNEO

Anna Ribas Palom
Catedrática de Geografía Humana, Universitat de Girona, España
anna.ribas@udg.edu
https://orcid.org/0000-0001-5163-0561

RESUMEN

Los espacios turísticos del litoral mediterráneo presentan una elevada exposición a las inundaciones como consecuencia del rápido e intenso proceso de urbanización que han experimentado desde mediados del siglo pasado y que se ha acentuado en las últimas décadas. Sin embargo, en este trabajo defendemos que su vulnerabilidad ha disminuido, al menos en términos agregados y respecto a otros territorios, como consecuencia de su menor sensibilidad a este tipo de riesgo y, especialmente, su mayor capacidad de adaptación. Para demostrarlo, se utiliza el enfoque conceptual de la vulnerabilidad y los tres componentes propuestos por el IPCC (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) para estudiar de qué manera se comportan estos tres componentes y las relaciones que se establecen entre ellos en el conjunto del litoral mediterráneo peninsular y, en particular, en dos espacios turísticos de la Costa Brava recientemente afectados por episodios de inundación (Vall d'Aro, 2005 y l'Estartit, 2020).

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen uno de los principales riesgos naturales de los espacios turísticos del litoral mediterráneo. Las características físicas de los episodios de precipitación desencadenantes de estos episodios han sido ampliamente estudiadas y son bastante conocidas. Además, en los últimos años, el interés por el estudio de los efectos estimados por la modelización climática ante los retos que plantea el cambio climático, también ha dado lugar a buen número de proyectos de investigación y publicaciones científicas. Sin embargo, cada vez hay mayor consenso entre los expertos de que los impactos de estas inundaciones dependen mucho más del componente humano que no de la magnitud y frecuencia de sus características físicas.

Y es que el rápido crecimiento demográfico y el desarrollo económico y tecnológico que, a expensas del turismo, han experimentado estos espacios son en buena medida explicativos de su creciente exposición a este riesgo natural. La exposición al riesgo ha aumentado de la mano de las rápidas transformaciones territoriales que acompañan al desarrollo turístico, desde el momento que los espacios de mayor riesgo de inundación (llanuras aluviales, deltas, espacios costeros situados a primera línea de mar) se convierten en lugares de gran atractivo para el crecimiento urbano, demasiadas veces descontrolado y frenético. Por lo tanto, los daños económicos y materiales asociados a las inundaciones, tanto los ya observados como los previsibles, están relacionados principalmente con un aumento de la acumulación de población y bienes en áreas inundables (Barredo 2009; Rosenzweig et al 2018; UNISDR y CRED, 2019).

Pero también, y como intentaremos demostrar en este trabajo, los niveles de vulnerabilidad de estos espacios han disminuido desde el momento que este mismo nivel de desarrollo económico, tecnológico y de bienestar ha favorecido el aumento de la capacidad de prever, hacer frente y

recuperarse de los daños ocasionados por el impacto de estos episodios. En Europa, al igual que ha pasado en la amplia mayoría de países y regiones desarrolladas, se ha observado una tendencia a la reducción de la mortalidad a consecuencia de las inundaciones (Tanue et al., 2016; Paprotny et al., 2018). Con respecto a los impactos económicos y materiales, en general se puede argumentar que las pérdidas económicas aumentan en términos absolutos, pero cuando se "normalizan" (es decir, en el contexto de la evolución de la población, el PIB y el PIB per cápita) pueden permanecer estables o incluso disminuir (Barredo, 2009; Barredo et al., 2012; Neumayer y Barthel, 2011).

El objetivo de este artículo consiste en analizar de qué manera estas tendencias de aumento de la exposición a las inundaciones pero disminución de la vulnerabilidad al riesgo se cumplen en los espacios turísticos del litoral mediterráneo peninsular. Para ello utilizaremos el enfoque conceptual de la vulnerabilidad, entendida como producto de la interacción entre tres componentes básicos: la exposición física a los eventos extremos; el grado de sensibilidad de la sociedad a los posibles impactos, y la capacidad de adaptación al riesgo. La exposición está relacionada con la posición relativa o ubicación de la población, las actividades económicas, los bienes tangibles e intangibles, etc. con respecto al evento natural. La sensibilidad a los daños se refiere a las características internas o propiedades de los elementos expuestos, es decir, sus características biológicas, físicas, sociales, económicas y culturales que pueden exacerbar o atenuar los efectos de la exposición y, por lo tanto, de los posibles impactos. Finalmente, la capacidad de adaptación se referiría a la capacidad de una sociedad de absorber los impactos de un episodio extremo sin que ocasione importantes trastornos en el funcionamiento de la sociedad y el territorio afectado (Ribas at al., 2020).

Este trabajo intenta explicar las relaciones entre estos tres componentes a partir de una doble aproximación. En primer lugar, se analizan estos tres componentes y sus relaciones para el conjunto del litoral mediterráneo peninsular. A continuación, se utiliza el caso de estudio de la Costa Brava (Girona) y de dos de los episodios de inundación más importantes que han afectado espacios turísticos de este litoral gerundense (Vall d'Aro, octubre de 2005; l'Estartit, enero de 2020) para examinar tanto las características del evento natural como del entorno humano en términos de exposición y vulnerabilidad. Finalmente se concluye con unas reflexiones finales que incluyen algunas recomendaciones para la mejora de las estrategias y medidas de adaptación a emprender.

2. PATRONES DE COMPORTAMIENTO DE LAS PRECIPITACIONES Y LOS CICLOS LOCALES DEL AGUA

En el litoral mediterráneo las inundaciones van asociadas mayoritariamente a episodios de precipitaciones que pueden ser de dos tipos. Por una parte, episodios de corta duración (entre 6 y 72 h) y que acumulan grandes cantidades de precipitación total (entre 200 y 500 mm. de media). Se presentan principalmente en otoño y esporádicamente en primavera. Pueden dar lugar a inundaciones que afectan amplias superficies del territorio. Si bien este ha sido el tipo de inundación históricamente más importante, también es cierto que la construcción a mediados del siglo pasado de obras hidráulicas, entre las que destacan los embalses, ha configurado complejos sistemas de defensa hidráulica que actúan desde entonces como efecto laminador de las avenidas. Sin embargo, para el caso de las inundaciones costeras, mayoritariamente vinculadas a cursos fluviales secundarios como serían las ramblas o rieras y, especialmente, a los temporales de mar, el efecto laminador o controlador de estas obras hidráulicas es mucho más complejo ante la rápida respuesta hidrológica de este tipo de cuencas cuando se producen episodios de precipitaciones abundantes. El ejemplo del último episodio de enero de 2020 que ha afectado el litoral mediterráneo peninsular respondería a este tipo de patrón de comportamiento de las precipitaciones que desencadenan inundaciones, si bien en este caso se ha producido en el mes estadísticamente más seco del año en la mayor parte de la región mediterránea.

Por otra parte, en el litoral mediterráneo también se dan episodios de muy corta duración (menos de

6 h) pero muy alta intensidad de precipitación (entre 20 y 150 mm. en un máximo de 2 h). Sin embargo, la cantidad total de precipitación acumulada no suele ser muy alta. La elevada intensidad de precipitación horaria que caracteriza estas precipitaciones intensas hace que el diseño urbano en términos de capacidad de las redes de drenaje urbano sea un aspecto crítico en la adaptación de estos espacios litorales. Las precipitaciones intensas aparecen especialmente durante el verano y principios del otoño y producen 'inundaciones locales". Sin embargo, los episodios de este tipo registrados en la costa mediterránea española durante los últimos años muestran un cambio significativo en el período de ocurrencia ya que se han producido episodios importantes fuera de los meses de otoño, a la vez que los observatorios de Valencia, Alicante o Palma de Mallorca han constatado una clara tendencia al aumento de estas precipitaciones intensas, de corta duración, durante la última década (Figura 1) (Olcina, 2017; Ribas et al., 2020).

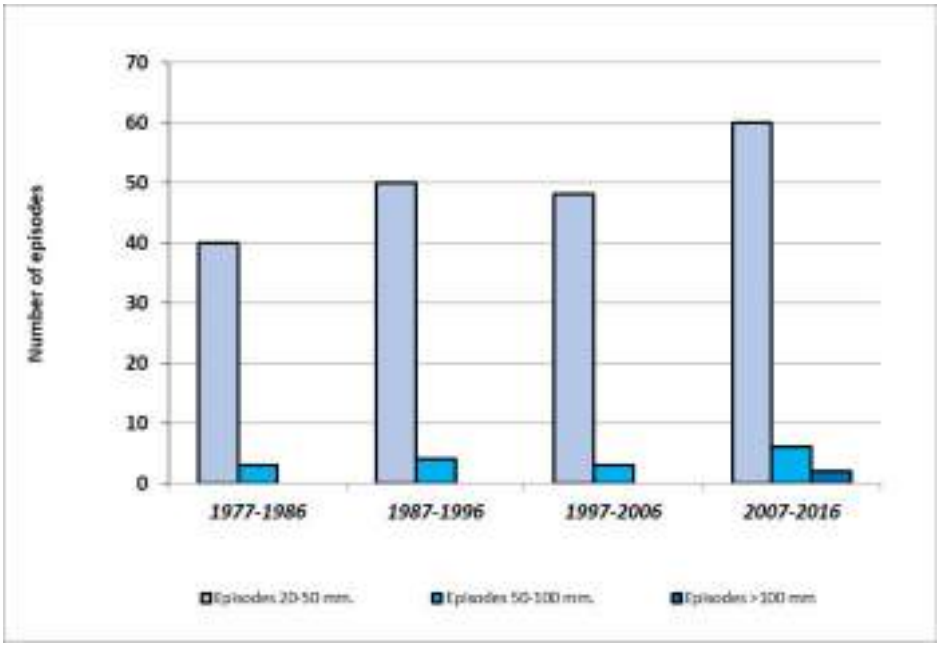


Figura 1. Evolución y tendencia de los episodios de precipitaciones de alta intensidad horaria en Palma de Mallorca (1977-2016). Fuente: Ribas et al. (2020).

Las predicciones de los últimos informes de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2015), siguiendo los parámetros de cálculo del informe del IPCC (2014), señalan que estas precipitaciones extremas tienden a ser más pronunciadas y severas. En la costa mediterránea, esta tendencia se acentúa por el efecto del calor acumulado del agua de mar y su papel en el aumento de la intensidad de las precipitaciones. Uno de los ejemplos que vamos a analizar en apartados posteriores (Vall d'Aro, octubre de 2005) respondería a este segundo patrón de episodio de inundación que afecta cada vez más a los espacios turísticos litorales.

3. UN RÁPIDO Y DESORDENADO PROCESO DE URBANIZACIÓN

La combinación de una mayor frecuencia y magnitud de episodios más virulentos con una mayor exposición puede aumentar las pérdidas especialmente en territorios que, como son los espacios turísticos, experimentan rápidas e intensas transformaciones socioeconómicas (Visser et al., 2014). El auge del turismo ha comportado la proliferación de segundas residencias, campings, hoteles, casas de turismo rural y otras infraestructuras y equipamientos turísticos, que han activado económicamente y demográficamente estos espacios, pero que también han significado un aumento de la exposición

de personas y bienes en espacios inundables. La construcción de infraestructuras y equipamientos cada vez más grandes y complejos (como los centros de distribución de servicios básicos que abastecen estos espacios turísticos, como son el agua, la energía, el gas o las telecomunicaciones), todos ellos altamente dependientes de la tecnología, se ubican demasiadas veces en espacios inundables y resultan frecuentemente afectados por las inundaciones.

En un estudio realizado recientemente, hemos podido constatar como la exposición a las inundaciones en el litoral mediterráneo español ha aumentado sustancialmente en el período 1998-2018 (Ribas et al., 2020). Se trata de un periodo crucial de la evolución urbana en España, con dos etapas claramente diferenciadas. En primer lugar, el periodo 1996-2007 viene marcado por un rápido crecimiento económico y un acelerado desarrollo urbano (Burriel, 2008). En segundo lugar, el periodo que se inicia con la crisis económica de 2008 y que comporta una desaceleración del crecimiento urbano (Albertos y Sánchez, 2014). La mayoría de estos crecimientos urbanos se han dado en las provincias litorales, incluyendo las Baleares, lo que ha acentuado el proceso de litoralización demográfica y económica (Tablas 1 y 2). Entre 1998 y 2018 la población del litoral mediterráneo aumentó en más de tres millones de personas, destacando los ritmos de crecimiento de provincias como Baleares, Girona, Almería, Alicante, Tarragona y Murcia (Tabla 1). Un crecimiento demográfico que irá de la mano del llamado "tsunami urbanizador" (Gaja, 2008) que afectó este litoral mediterráneo especialmente en el primer período y que ha comportado que en estos 20 años el ritmo de artificialización del suelo se sitúe alrededor del 40% en el conjunto del litoral mediterráneo y que los usos urbanos del territorio detectados a través de la luminosidad nocturna se hayan más que doblado (Tabla 2). El litoral mediterráneo español constituye, a día de hoy, la macroregión urbana con mayor peso demográfico y económico de la península ibérica.

Provincia	Año 1998	Año 2018	Tasa de crecimiento (%)
Girona	543.191	761.947	40,27
Barcelona	4.666.271	5.609.350	20,21
Tarragona	580.245	795.902	37,16
Castellón	461.712	576.898	24,94
Valencia	2.172.796	2.547.986	17,26
Alicante	1.388.933	1.838.819	32,39
Murcia	1.115.068	1.478.509	32,59
Almería	505.448	709.340	40,33
Baleares	796.483	1.128.908	41,73
Total	12.230.147	15.447.659	26,30

Tabla 1. Población por provincias y tasa de crecimiento demográfico en el litoral mediterráneo peninsular (1998-2018). Fuente: INE.

Este espectacular aumento de la urbanización ha ido acompañado de un aumento de la exposición al riesgo de inundación, en lo que se ha venido denominando "la litoralización del riesgo" (Olcina, 2009). En Cataluña, por ejemplo, entre 2000 y 2009 se construyeron más de 210.000 nuevas viviendas en municipios clasificados como de "alto riesgo de inundación" (Departament de Territori i Sostenibilitat Generalitat de Catalunya, 2014; Departament d'Interior, Direcció General de Protecció Civil, Generalitat de Catalunya, 2014). En Valencia, las áreas propensas a inundaciones sumaron unos 1.440 km^2 en 2013, con casi un millón de personas potencialmente afectadas (Generalitat Valenciana, 2013). En los municipios litorales de Alicante y Murcia, entre 1994 y 2013, se construyeron 6.813.211 m^2 en zonas inundables, que, añadidos a lo que ya había acumulado, dan como resultado una cifra global de 21.837.416 m^2 (Pérez Morales et al., 2016).

Provincia	Año 1992	Año 2012	Tasa de cambio (%)
Girona	117	613	423,93
Barcelona	1.170	1.779	52,05
Tarragona	299	663	121,73
Castellón	119	553	364,70
Valencia	494	1.204	143,72
Alicante	400	1.144	186
Murcia	433	1.606	270,90
Almería	58	264	363,79
Palma	155	246	58,70
Total litoral	3.245	8.072	148,75

Tabla 2. Superficie de suelo con nivel de luminosidad urbana en un radio de 50 km de las capitales de provincia del litoral mediterráneo peninsular (superficie total, 1992 y 2012, en km^2 y tasa de cambio 1992-2012, en %). Fuente: elaboración propia a partir de Grup d'Estudis sobre Energia, Territori i Societat (GURB), 2017. Nota: En España, por cada km^2 de suelo efectivamente urbanizado la luminosidad urbana cubre $2{,}4km^2$ (Nel·lo, 2017).

4. SENSIBILIDAD Y RESILIENCIA DE LOS ESPACIOS TURÍSTICOS A LAS INUNDACIONES

Sin embargo, este aumento de la exposición a las inundaciones en los espacios turísticos litorales no se traduce en un aumento paralelo de la vulnerabilidad, sino todo lo contrario, al menos en lo que concierne a las víctimas humanas (Barredo et al., 2012). Las muertes causadas por las inundaciones siguen una tendencia descendente en todo el litoral mediterráneo peninsular y los episodios con más de 5 víctimas mortales son excepcionales. Es de destacar, pero, que entre estas víctimas encontramos cada vez más a los transeúntes y residentes temporales, desconocedores de los riesgos asociados a estos episodios de precipitaciones intensas, temporales de mar o al desbordamiento de ramblas costeras, ocupadas ahora por urbanizaciones o convertidas en calles (Vera, 2003; Perles, 2010). El comportamiento de estas personas genera muchas veces verdaderas situaciones de peligro que podrían ser evitadas con una adecuada información.

En los espacios turísticos las inundaciones pueden comportar una disrupción temporal de la actividad turística y la vida cotidiana de los residentes, pero la mayoría de las veces la recuperación de esta actividad se produce en un plazo relativamente breve. El nivel de riqueza que se genera en estos espacios turísticos, junto a un aumento del número y eficiencia de las medidas de adaptación que se llevan a cabo, revierte claramente en una disminución de la vulnerabilidad global al riesgo de inundación. Después de un episodio, todos los esfuerzos, desde las mismas empresas turísticas o particulares afectados hasta las administraciones locales o supralocales, se centra en "recuperar" lo más rápidamente las playas, paseos, edificios, equipamientos y servicios públicos para que vuelvan a ser completamente funcionales lo más pronto posible, o lo que equivale a decir, a actuar con urgencia ante la próxima temporada turística. En gran medida, pues, la reducción de la vulnerabilidad a las inundaciones está relacionada principalmente con el aumento de la capacidad de adaptación y no con la reducción de la exposición (Olcina et al., 2016).

4.1. Una clara apuesta por la obra hidráulica

En los espacios turísticos las medidas de adaptación al riesgo de inundación más extendidas han sido las estructurales, es decir, aquellas que tienen por objetivo el control del agua. El rápido y demasiado a menudo descontrolado crecimiento urbano de unos espacios de gran atractivo turístico ha

encontrado en el desvío, canalización, soterramiento y, en general, la construcción de obras hidráulicas de defensa de todo tipo, la mejor opción para ocupar espacios inundables ya sea fluviales o marítimos, primando desde el primer momento y hasta hoy en día los beneficios de esta ocupación por sobre de los perjuicios. Como consecuencia, muchos de estos entornos fluviales y marítimos han perdido totalmente su condición de recurso para el territorio y ganan en su dimensión de riesgo, de ahí que en muchos casos se ha optado por eliminarlos o marginalizarlos totalmente del entramado urbano, convertidos en espacios artificializados, desprovistos de lvalores ambientales, sociales o paisajísticos. Sólo en contadas ocasiones se vislumbra algún intento de recuperación ecológica y acondicionamiento de algunos de estos espacios inundables fluviales y marítimos para usos públicos. Pero los espacios turísticos del litoral mediterráneo ofrecen buenos ejemplos de cómo las obras hidráulicas no proporcionan una seguridad absoluta. Por el contrario, recrean una imagen de lo que ya G.F. White llamó la "falsa seguridad" y provocan el llamado "efecto escalada" desde el momento que favorecen la ocupación y transformación de los espacios inundables que protegen (Roset et al., 1999; Saurí et al., 2001). Entonces, en el momento que se da una inundación que supera la capacidad de control, almacenamiento o laminación de estas obras hidráulicas, o, incluso, cuando esta obra no se gestiona adecuadamente, los daños pueden llegar a ser mayores de que si incluso no existiera. Pero la mayor paradoja de las grandes obras hidráulicas, como son los embalses, tiene más que ver en cómo se gestiona el agua almacenada, especialmente en el dilema que se presenta entre retener el máximo posible de agua para abastecer las necesidades humanas (como el regadío, el abastecimiento urbano, la producción de energía, etc.) y conservar un cierto margen de seguridad que permita laminar las crecidas. Según hacia dónde se decante la balanza en situaciones de precipitaciones abundantes aguas arriba de los embalses, pues, podemos hablar de riesgo de sequía o de riesgo de inundación. Y esta fue la controvertida situación que, como se explicará más adelante, se produce en episodios que acaban afectando a algunos de estos espacios turísticos litorales, y que ha dado lugar a conocidos aforismos como el que dice que “El que está en la cola, o se seca o se ahoga”. Esta fue la situación que, como veremos más adelante, sucedió durante el episodio del temporal Gloria de enero de 2020 en el caso de l’Estartit.

A medida que los ríos, rieras y ramblas se han regulado y las llanuras de inundación están protegidas con dispositivos hidráulicos, la mayor parte de la inversión en obras de protección contra inundaciones de los últimos años se ha dirigido al drenaje urbano, que se ha convertido en una verdadera pesadilla. Dado el entorno físico peculiar de muchos de estos espacios turísticos litorales, respaldados por relieves abruptos capaces de concentrar grandes volúmenes de escorrentía después de fuertes precipitaciones, y las alteraciones producidas en los patrones de drenaje urbano como consecuencia de los rápidos e incontrolados procesos de crecimiento urbano, no es sorprendente encontrar amplias superficies costeras totalmente inundadas después de una tormenta. La solución hidráulica a este drenaje costero ha optado casi siempre por convertir cursos efímeros en alcantarillas, manteniéndolos bajo tierra y, por lo tanto, lejos de la vista del público, lo que ha convertido la gestión de las aguas de tormenta en los sistemas de saneamiento en una de las mayores preocupaciones de las administraciones locales.

En definitiva, actualmente se podría decir que la mayoría de cursos fluviales de estos espacios turísticos litorales ya se encuentran sometidos a alguna forma u otra de control hidráulico. Las obras hidráulicas de protección contra inundaciones son generalmente bien aceptadas por la población, especialmente a nivel local, donde los ayuntamientos se esfuerzan por obtener este tipo de fondos para el control de inundaciones de las autoridades regionales y nacionales. Muchas veces el argumento es simplemente que, dado el nivel de desarrollo en áreas propensas a inundaciones, las obras hidráulicas se justifican como la única forma factible de suprimir las inundaciones en estos espacios turísticos. Sin embargo, la financiación para obras de control de inundaciones ha disminuido en los últimos años debido a otras preocupaciones, quizás más apremiantes, en otras áreas del ciclo del agua, especialmente el suministro de agua (desde la construcción de plantas de tratamiento de

agua potable hasta desalinizadoras) y, especialmente, plantas de tratamiento de aguas residuales, que permiten no solo cumplir con las normativas europeas sino también aumentar la calidad del agua de baño. Por lo tanto, los proyectos pendientes tienen que enfrenarse no solo a las restricciones presupuestarias, sino también a un cierto cambio de perspectiva en la gestión de las inundaciones desde el momento que otras alternativas a las obras hidráulicas empiezan a entrar en escena. Aparece un discurso que reclama cada vez más "vivir con las inundaciones" desde el momento que reconoce que las inundaciones son imposibles de eliminar y que, por lo tanto, las soluciones hidráulicas pueden tener que comenzar a compartir espacio con otras alternativas, especialmente las que pasan por una mejor planificación de los usos del suelo en áreas inundables.

4.2. La previsión y planificación de las emergencias

Quizás es en esta parte de la secuencia de gestión del riesgo de inundación donde se han realizado más progresos durante las últimas tres décadas. Los sistemas de alerta de inundaciones han mejorado enormemente después del continuo progreso tecnológico en la captura y procesamiento de datos meteorológicos asociados a las precipitaciones desencadenantes de las inundaciones. La tecnología de radar permite transmitir en tiempo real los datos de precipitaciones y caudales, el monitoreo de las inundaciones a medida que se desarrollan y, lo que es más importante, ayudar en la toma de decisiones cuando se trata de avisar, confinar o evacuar a la población ante inminentes eventos que puedan sucederse. Los modelos predictivos a corto plazo de las condiciones climáticas también se han vuelto de uso común. Sin embargo, dadas las enormes complejidades asociadas con el pronóstico del clima mediterráneo, la predicción a pequeña escala sigue siendo difícil y probablemente seguirá siéndolo, al menos a corto plazo.

La planificación de emergencias a escala local también ha dado grandes pasos en los últimos años. De acuerdo con la legislación española y regional, los municipios deben desarrollar un Plan Básico de Emergencia Municipal si tienen una población censal de 20.000 habitantes o más, o si son considerados como turísticos. Sin embargo, ni todos los municipios turísticos tienen estos planes de emergencia locales redactados y homologados ni, lo que es peor, realmente implantados en el territorio.

4.3. Planificación de los usos del suelo frente el riesgo de inundación

De todas las opciones de gestión existentes, una en particular parece ser especialmente difícil de implementar en los espacios turísticos: la regulación de los usos del suelo en espacios inundables. Si bien los beneficios sociales y ambientales de esta opción son evidentes, la oposición local suele ser elevada en unos espacios enormemente atractivos para el desarrollo turístico.

La aprobación de la Directiva Europea sobre Inundaciones (CE/60/2007) está ayudando al impulso de las medidas no estructurales en la gestión de inundaciones, como es precisamente la planificación de los usos del suelo. Esta directiva europea requiere del análisis del riesgo de inundación y la elaboración de una cartografía de calidad para cada demarcación hidrográfica, lo que ha comportado que actualmente se esté desarrollando una gran base de datos de cartografía de áreas inundables en España (Cartografía Nacional de Zonas Inundables, escala 1/10:000). Si bien todas estas iniciativas deben ser aplaudidas, la cuestión crucial sigue siendo quién tiene la autoridad para otorgar o negar nuevos desarrollos urbanos en espacios inundables. Incluso si, basándose en información cartográfica, la autoridad hidráulica puede recomendar, por ejemplo, la prohibición de algunos desarrollos urbanos, la última palabra aún está en manos de las administraciones locales y regionales. Además, es bien sabido que la cartografía de los riesgos naturales no deja de ser controvertida, ya que puede depender de extrapolaciones, datos contradictorios, opiniones de expertos y similares. La situación se complica aún más por las apremiantes necesidades de desarrollo durante los períodos de dificultades económicas o sociales, como sucede actualmente con la pandemia de COVID19. A todo ello se suma, el incremento de la peligrosidad climática que señalan los escenarios de cambio

climático en las latitudes medias y, especialmente, en la región mediterránea, para las próximas décadas. Este hecho representa una amenaza para los espacios turísticos litorales puesto que a la acción antrópica de transformación territorial se le añade una mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos.

Los efectos de los últimos temporales marítimos, especialmente el temporal Gloria acaecido en enero de este año 2020, con graves efectos en todo el litoral mediterráneo español, han abierto el debate sobre la ocupación con usos urbanos de los espacios inundables, especialmente los situados en la primera línea de costa (Tena, 2020). Los temporales de los meses de enero de 2017 y, especialmente, 2020 han ocasionaron graves daños en paseos marítimos, instalaciones de primera línea de costa y en edificaciones (viviendas, restaurantes, bares, comercios), que en su mayoría ya han sido rehabilitadas, bien por el pago de indemnizaciones del seguro (Consorcio de Compensación de Seguros) o bien a cargo de los presupuestos públicos municipales, regionales y/o estatales. No obstante, comienzan a surgir opiniones críticas no solo de expertos sino también desde la política estatal y municipal que han puesto en cuestión la reconstrucción de las zonas costeras afectadas por la borrasca Gloria, principalmente porque, muy claramente, por primera vez este episodio se asoció con el cambio climático. Sin embargo, la pandemia y la crisis económica y social asociada que ha seguido apenas unas semanas después al temporal Gloria seguramente traerá más presiones para continuar con el estado actual.

5. LA COSTA BRAVA COMO TERRITORIO DE RIESGO

Podemos afirmar sin miedo a equivocarnos que cualquiera de las regiones turísticas del litoral peninsular nos puede servir para ilustrar como el desarrollo turístico ha llevado a la creación de nuevos territorios de riesgo frente a las inundaciones. En este apartado hemos elegido una de estas regiones, la Costa Brava, a fin de presentar como las tendencias de aumento de la exposición a las inundaciones, pero disminución de la vulnerabilidad al riesgo se cumplen en este espacio turístico del litoral. Nos detendremos en el análisis de dos de los episodios de inundación que más la han afectado en los últimos años (Vall d'Aro, octubre de 2005; l'Estartit, enero de 2020) para examinar en detalle las características socioeconómicas en términos de exposición y vulnerabilidad.

En un estudio realizado en el año 2008, el análisis de datos instrumentales de diferentes registros de precipitaciones ubicados en la Costa Brava para el período 1951-2000 no detectaba cambios destacados en la variabilidad y la torrencialidad de la precipitación. Aunque se constató un cierto descenso anual de la irregularidad de la precipitación, los únicos aumentos significativos tanto de la variabilidad como de la torrencialidad se concentraban en verano (Ribas et al., 2008). Nada llevaba a pensar, pues, que se hubiera producido, en este periodo temporal analizado, un aumento muy destacado ni de la magnitud ni la frecuencia de los episodios de precipitaciones desencadenantes de los episodios de inundación.

Sin embargo, este mismo estudio ya observaba que las precipitaciones torrenciales en la Costa Brava podrían ser más frecuentes en primavera por un aumento de la irregularidad vinculada a una tendencia negativa del WeMOi en esta estación del año (Ribas et. al, 2008). Otros estudios realizados por aquellos mismos años apuntaban que en el caso del Mediterráneo se observaba una tendencia al aumento de la frecuencia de los episodios extremos (Christensen y Christensen, 2003). Lehner et al. (2006) también afirmaban que para el caso de Europa, las precipitaciones de periodo de retorno 100 años pasarían a ser de entre 40 y 70 años, especialmente en el litoral y prelitoral mediterráneo.

Estudios más recientes indican que el cambio climático ejerce una influencia creciente en las futuras tendencias de las inundaciones. En Europa, por ejemplo, las inundaciones asociadas con períodos de retorno de 100 años pueden duplicar su frecuencia alrededor de 2050 (Alfieri et al., 2015). En Europa,

las pérdidas por inundación aumentarían cinco veces para 2050 y 17 veces para 2080 (EEA, 2016). El *Tercer Informe sobre el Cambio Climático en Cataluña* (2016) también apunta a que se detecta una tendencia significativa en el aumento de la precipitación por día de lluvia en Cataluña, en la precipitación de carácter convectivo, especialmente en verano. Si bien los escenarios no son concluyentes, el posible aumento de las precipitaciones torrenciales conllevaría un incremento del riesgo de inundación. Aun así, la mayoría de los estudios continúan atribuyendo la mayor parte de estos impactos crecientes a factores socioeconómicos más que a factores naturales.

5.1. La Vall d'Aro, Costa Brava centro (12 y 13 de octubre de 2005)

El primer caso de estudio que vamos a analizar es el episodio ocurrido los días 12 y 13 de octubre de 2005. Los municipios de la Costa Brava más afectados fueron los de la Vall d'Aro, concretamente Castell-Platja d'Aro, Calonge, Santa Cristina d'Aro y Sant Feliu de Guíxols, contabilizándose las pérdidas en una víctima humana, 3.000 viviendas y comercios afectados, 800 vehículos dañados, 4.000 plazas de aparcamiento inundadas y más de 20 millones de euros en pérdidas económicas (Figuras 2 y 3).

En la estación meteorológica de Castell-Platja d'Aro, entre el 12 y el 14 de octubre, se recogieron 348,2 mm, de los cuales 254,4 en un solo día, el 13 de octubre. Estadísticamente, los 254,4 mm de precipitación acumulada en 24 horas se corresponderían con un episodio de aproximadamente 200 años de período de retorno. Se trata, pues, de un fenómeno natural de magnitud extraordinaria, pero de características meteorológicas e hidrológicas bastante bien conocidas e incluso con antecedentes similares como los episodios del otoño de 1975, 1990 o 1994, que afectaron este mismo litoral gerundense. El gran cambio se ha producido, sin duda alguna, en la exposición al riesgo de inundación.



Figura 2. Área afectada per la inundación del 13 de octubre de 2005 en la cuenca de la riera de Calonge. Fuente: Serra (2008).



Figura 3. Área afectada per la inundación del 13 de octubre de 2005 en la cuenca del río Ridaura. Fuente: Serra (2008).

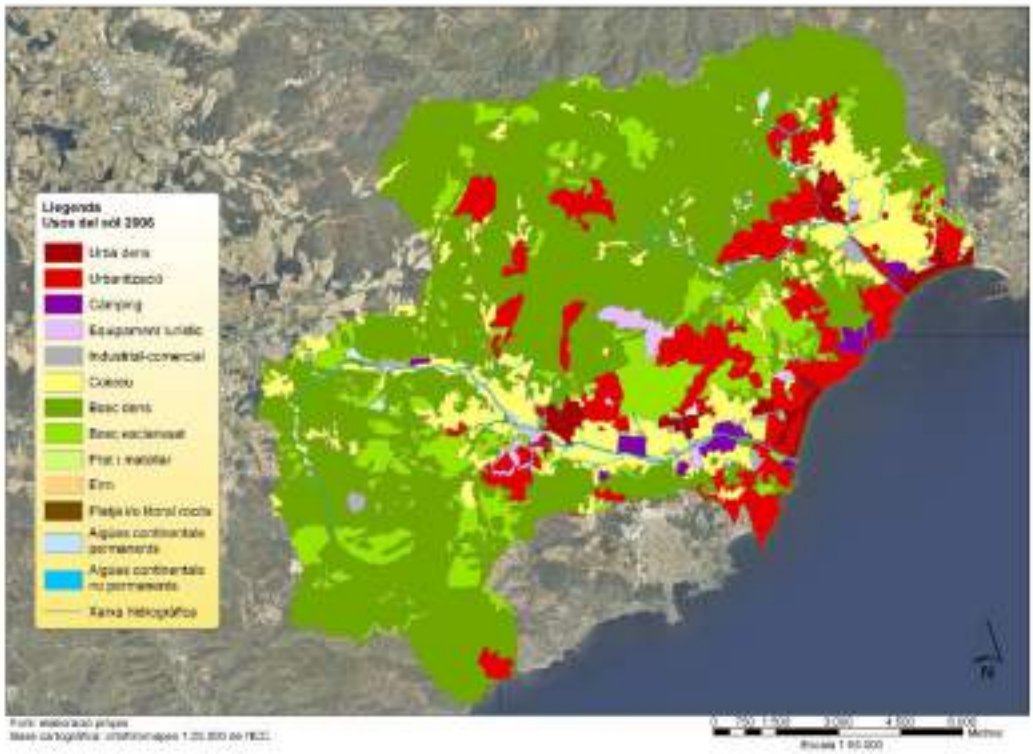


Figura 4. Usos del suelo en las cuencas del río Ridaura y la riera de Calonge, año 2006. Fuente: Serra (2008).

Los cuatro municipios afectados habían doblado en 17 años la población, pasando de los 12.209 habitantes empadronados en 1990 a los 24.322 del año 2007. Todo ello había implicado no sólo un crecimiento de la ocupación de los espacios inundables sino también cambios en el régimen hidrológico de las cuencas fluviales, cada vez más artificializadas (Figura 4). Este rápido aumento demográfico se explica principalmente por dos factores. Por una parte, la gran oferta laboral que estos

espacios turísticos habían generado de la mano de una actividad turística y de servicios en continuo auge, y que había motivado la llegada en los últimos años de un gran contingente de personas en busca de un puesto de trabajo. Por otra parte, el aumento espectacular de las urbanizaciones, instalaciones e infraestructuras turísticas en una zona con muchos atractivos turístico-residenciales, aunque se debe tener en cuenta que una buena parte de este gran grupo de población no es permanente sino estacional (Castell-Platja d'Aro fue el municipio catalán con un porcentaje más elevado de población estacional en 2003, mientras que el municipio de Calonge ocupó el octavo lugar).

El conjunto de los índices económicos disponibles para el año 2005 y su evolución en las últimas décadas (renta familiar bruta disponible per cápita, nivel económico e índice de actividad económica) y que se pueden consultar en la publicación de Ribas y Serra (2009), ilustran como los tres municipios presentaban en el momento que ocurre esta inundación un elevado nivel de bienestar económico, lo cual es indicativo de una menor vulnerabilidad ante el un episodio de magnitud elevada como el sucedido. Sin duda alguna, las posibilidades económicas permiten a estos municipios tener una mayor capacidad para asumir las pérdidas ocasionadas por las inundaciones y una mayor facilidad para recuperarse de los desperfectos, retornando a una situación de "normalidad" en poco tiempo. Igualmente, las posibilidades económicas que en aquellos años tenían las diferentes escalas de la administración pública competente (desde la municipal al estatal) también revirtieron en una mayor capacidad para implantar diferentes medidas destinadas a la mejora de la gestión de las inundaciones.

Efectivamente, tras la inundación de octubre de 2005 se planifican importantes actuaciones de defensa frente a futuras inundaciones. Se canaliza la riera de Calonge en su último tramo y se rehacen dos puentes. También se canaliza el río Ridaura, con el objetivo de mejorar el funcionamiento hidráulico del río a su paso por el municipio de Castell-Platja d'Aro, concretamente en el centro turístico de Platja d'Aro. Las actuaciones en la riera de Calonge ascendieron a 12,6 millones de euros, a los que hubo que sumar 6 millones de euros más de la canalización del tramo final del río Ridaura. A pesar de esta clara apuesta por las obras hidráulicas, dos importantes cambios se producen respectos a episodios anteriores. En primer lugar, en el caso de la riera de Calonge, los costes de la canalización no recaen únicamente sobre la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) sino que un 25% de estos costes son sufragados por el propio ayuntamiento, en línea con el cofinanciamiento que a partir la aprobación en noviembre de 2010 del *Pla de gestió del Districte de conca fluvial de Catalunya* requiere la ACA. Por otra parte, también en este *Pla* se hace explícito un cambio de orientación de la política respecto a la prevención de las inundaciones. Las principales medidas de gestión que pretende llevar a cabo la ACA se orientan más hacia las de tipo no estructural, con acciones como la revisión de la zonificación del espacio fluvial a fin de hacerla compatible con el Reglamento de la Ley de urbanismo y el Reglamento del dominio público hidráulico. De ahí nace, para el caso que nos ocupa, la creación del Parc dels Estanys, un parque inundable con capacidad para almacenar 60.000 m^3, que recoge el excedente de agua del Río Ridaura y de la red de aguas pluviales después de fuertes precipitaciones y que reduce el riesgo de inundación en el núcleo de Platja d'Aro. Esta actuación, a la vez, hace posible la recuperación de un espacio de 15 hectáreas de humedales. Nuevamente, el ayuntamiento destina en aquel momento 168.000 euros a este proyecto en la primera fase, y se prevé una segunda fase más adelante, para completar la zona verde.

Otra de las medidas clave en la mejora de la gestión del riesgo de inundación en estos municipios pasa por un control de los usos del suelo permitidos en los espacios inundables. En la cuenca del Ridaura la planificación urbanística califica algunos espacios inundables para periodo de retorno de 500 años como urbanizables, tanto en la zona de cabecera como a los tramos medio y bajo, mientras que en el caso de la riera de Calonge esta calificación urbanística aparece especialmente en el casco urbano de Calonge. La revisión de estos planeamientos municipales (algunos de ellos todavía en curso), la redacción del *Pla d'Espais Fluvials del riu Ridaura i la riera de Calonge* (ACA) y la entrada en vigor del artículo 6 del Decreto 305/2006 del nuevo Reglamento de la Ley de Urbanismo por el

que se dictamina que la ACA y la administración urbanística competente deben actuar coordinadamente en la redacción de los planes urbanísticos, integrando los aspectos urbanísticos, hidráulicos y ambientales, debe conllevar la recalificación de usos de estos espacios inundables todavía hoy algunos de ellos urbanizables.

5.2. L'Estartit (del 20 al 23 de enero de 2020)

El segundo caso de estudio es el reciente episodio de enero de 2020 que afectó todo el litoral mediterráneo peninsular, y que, en el caso de la Costa Brava, el municipio turístico más afectado fue Torroella de Montgrí-l'Estartit, en la cuenca del río Ter. El temporal Gloria dejó cantidades de precipitación muy destacadas en toda la cuenca, llegando a recogerse más de 400 mm en Sant Pau de Segúries o Viladrau, en la parte alta, y más de 250 mm en todas las estaciones meteorológicas de la cuenca, incluyendo la estación meteorológica de l'Estartit. El temporal marítimo que afectó todo el litoral catalán también afectó los municipios litorales de la cuenca del Ter, y en l'Estartit se registraron olas de más de 6 metros de altura (Figura 5).

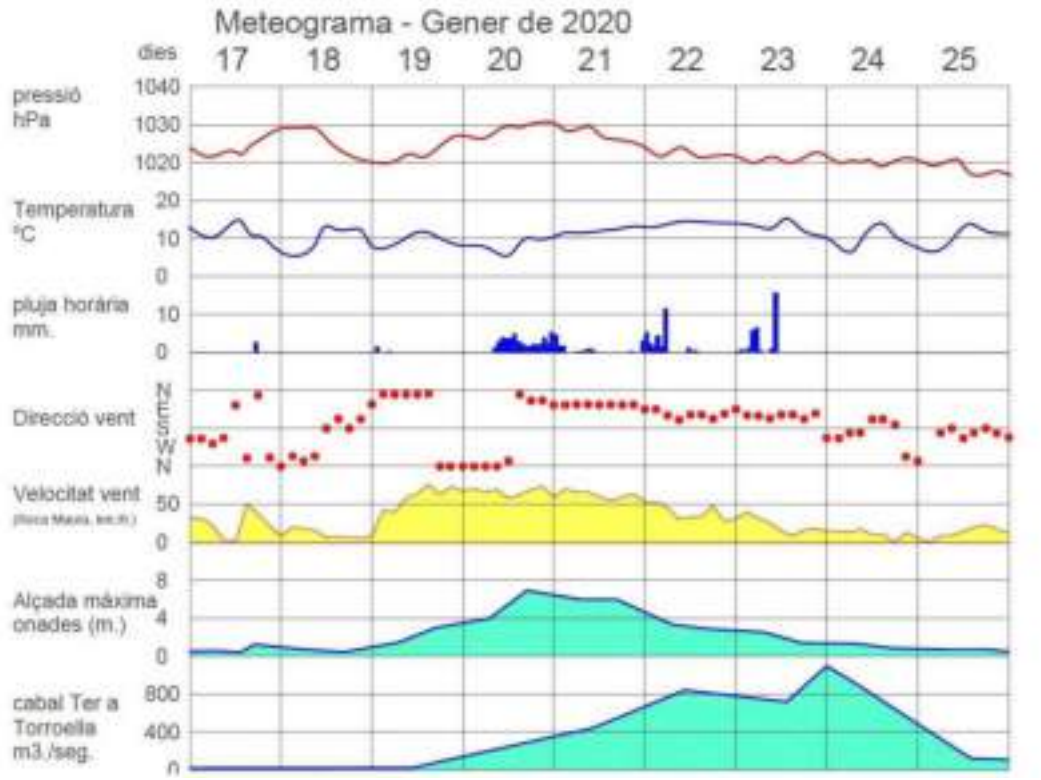


Figura 5. Meteograma de los días del temporal Gloria en l'Estartit (17-25 de enero de 2020). La altura de las olas y el caudal del Ter son aproximadas. Fuente: Josep Pascual. Estació Meteorològica de l'Estartit i de Torroella de Montgrí http://meteolestartit.cat/

Los caudales máximos registrados en el Ter superaron los 1.000 m^3/s en las estaciones de aforo situadas en la entrada al pantano de Sau, en Girona, Colomers y Torroella de Montgrí. El agua que hubo que desembalsar desde los pantanos de Sau y Susqueda, sumada a la de la lluvia y las aportaciones de las afluentes aguas abajo de los pantanos, llegó a multiplicar por 250 su caudal ordinario. En la cuenca baja, a las afectaciones ya habituales en otros episodios anteriores como el corte de carreteras y caminos por inundación, también resultaron muy dañados los campos de cultivo (especialmente de frutales) y sus infraestructuras de apoyo (canales de riego, caminos de acceso, etc.), afectando un total aproximado de 12.000 hectáreas de cultivos.

El núcleo del Estartit, por su ubicación entre el macizo del Montgrí y el mar, y su crecimiento en forma de urbanizaciones encima o cerca de antiguas zonas de humedales litorales y próximas a la desembocadura del Ter, lo convierte en el núcleo turístico más expuesto a las inundaciones provocadas por los temporales de mar, el desbordamiento del Ter, los canales de regadío o, simplemente, por episodios de precipitaciones intensas (Pascual, 2005). Las urbanizaciones de Griells y Salats ocupan espacios próximos al Ter Vell, y Mas Pinell se sitúa muy cerca de la desembocadura del Ter. Los campings (El Delfín Verde, La Sirena, Medas, etc.) también se ubican en espacios expuestos a las inundaciones. Todas estas actividades vinculadas al sector turístico, así como las infraestructuras y servicios que los apoyan (carreteras, viales urbanos, caminos) resultan afectadas por cada nuevo episodio de inundación. Durante el temporal Gloria quedaron cortadas las carreteras de acceso a l'Estartit. Las playas de l'Estartit y Pals también sufrieron los efectos del temporal marítimo y el desbordamiento del Ter, con la acumulación de toneladas de troncos, restos vegetales y otros residuos (plásticos, vidrio, etc.). La inundación de la planta de tratamiento de agua potable de Torroella de Montgrí-L'Estartit y las conducciones de provisión de la misma supuso que durante tres semanas estos núcleos de población tuvieran que abastecerse de otras fuentes. También fue necesario desalojar 180 personas del camping Medes y trasladar temporalmente la mayoría de las caravanas que había hacia puntos más elevados.

Este episodio constituye un claro ejemplo de la gran paradoja de los embalses multifuncionales como son los que tenemos en la cuenca del Ter. Desde su construcción, los embalses de Sau (1949-1963) y Susqueda (1963-1968) habían ejercido la función de laminación de las avenidas del Ter aguas abajo de los embalses y hasta su desembocadura en la playa de Pals. Pero estos embalses se construyeron y siguen teniendo la función prioritaria de abastecer de agua buena parte de la población catalana, especialmente Barcelona y su área metropolitana, la Costa Brava Centro y Girona y su área urbana (Gaya, 2014). Durante el temporal del mes de enero entraron en el sistema Sau-Susqueda-el Pasteral un total de 210 hm^3 de agua, es decir, la mitad de todo el volumen que se puede almacenar. O lo que es lo mismo, los embalses pasaron de poco menos del 70 al más del 100% de su capacidad en sólo tres días, hasta llegar al 108% de su capacidad el 25 de enero.

La decisión de desembalsar y cuándo hacerlo, es, según los expertos, muy complicada, y desde el ACA se decidió no desembalsar días antes del episodio a pesar que el viernes 17 enero los modelos meteorológicos utilizados por el equipo de Predicción y Vigilancia del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) preveían que en las comarcas del Ripollès, Osona y la Garrotxa podrían caer más de 330 litros, además de un fuerte temporal marítimo en toda la costa mediterránea. Esta incertidumbre de las previsiones fue la razón que esgrimió la ACA para no desembalsar más agua de los embalses antes del temporal (La Vanguardia, 01/24/2020) ante el dilema entre retener el máximo posible de agua (y minimizar de esta manera un posible episodio de sequía hidrológica) o conservar un cierto margen de seguridad para laminar las crecidas.

Esta decisión fue cuestionada por algunos expertos (Gaya, 2020) y, especialmente, por buen número de responsables políticos de los municipios situados aguas abajo de los embalses. En cualquier caso, en defensa de los embalses, pero, hay que decir que sin Susqueda y Sau y su acción reguladora, el caudal del río se estima que hubiera llegado a ser aún más elevado, cerca de los 2.900 m^3/s, lo que significa acercarse a niveles del período de retorno de los 300 años a su paso por la ciudad de Girona (Feliu, 2020). También parece bastante acertada la decisión de la ACA de no liberar agua de los embalses en los momentos en que los afluentes alcanzaban su caudal máximo, como fue el caso del Onyar en Girona, que el 21 de enero alcanzó su caudal máximo instantáneo con una punta de 534,69 m^3/s. Con todo, una vez el 22 de enero los embalses llegaron al 100% de capacidad, el margen de gestión tuvo que limitarse a realizar el seguimiento de cuándo, cómo y dónde llegaría la gran ola procedente del desbordamiento de Sau, Susqueda y el Pasteral. A partir de este momento, el despliegue de técnicos y cargos políticos aguas abajo de los embalses fue generalizado por parte de

todas las administraciones competentes, desde el ACA y el Consorcio del Ter hasta los propios ayuntamientos. Protección Civil, bomberos, agentes rurales, voluntarios, medios de comunicación, cargos técnicos y políticos de los ayuntamientos, hicieron un seguimiento continuado del episodio. También la amplia mayoría de la ciudadanía ubicada en los espacios inundables respondió a la llamada de las autoridades a abandonar las plantas bajas para reubicarse en otras viviendas o estancias situadas a nivel superior. La rotura de la mota del Ter provocó el desbordamiento del río en su curso bajo y la inundación de buena parte de los campos de cultivo, urbanizaciones e instalaciones turísticas situadas en esta parte baja de la cuenca, siendo el municipio de Torroella de Montgrí-l'Estartit el que mayores pérdidas tuvo de toda la cuenca (4,3 millones de euros en pérdidas económicas).

Una vez finalizado el episodio, la mayoría de los implicados en la gestión coinciden en aquello que habría que mejorar para otras inundaciones que se puedan dar. En primer lugar, la poca información del desarrollo de la avenida de que disponían los alcaldes de las localidades más pequeñas situadas aguas abajo de los embalses. Se evidenció, por ejemplo, una falta de protocolos a la hora de decidir los cortes de carretera y, sobre todo, de los puentes. En segundo lugar, el levantamiento precoz del confinamiento en algunas poblaciones cuando estaba por llegar la avenida más importante. En este sentido, la disponibilidad tecnológica actual debería hacer posible que los ayuntamientos y los ciudadanos pudieran disponer de información en tiempo real y recibir los avisos pertinentes en cada momento. Del mismo modo que la disponibilidad de una cada vez mejor cartografía de detalle de las áreas inundables de la cuenca del Ter debería ponerse a disposición de los ciudadanos en un formato fácilmente comprensible para todos. Y finalmente, la curiosidad inherente a la condición humana, que hacía que mucha gente, inconsciente y temeraria, se acercara a los cursos fluviales, los puentes o los bosques de ribera que caían por el embate de las aguas (Feliu, 2020).

Como aspecto positivo, una actuación emblemática llevada a cabo en los últimos años en l'Estartit, consistente en la desurbanización de un espacio inundable y de restauración de sistema de humedales, ha demostrado su capacidad para frenar las inundaciones. Se trata del proyecto LIFE Pletera, que se ha llevado a cabo en los últimos años en el espacio de la Pletera, al sur del núcleo urbano de este núcleo turístico (Pueyo et al., 2017 y 2018). También como aspecto positivo cabe destacar el hecho que ayuntamientos y ciudadanía se volcaron inmediatamente después del temporal, a organizarse para recoger los residuos de todo tipo que el río había dejado en sus márgenes y en las playas. Durante los fines de semana inmediatos al episodio, grupos de personas autoorganizadas o a través de entidades o los mismos ayuntamientos organizaron acciones de limpieza de cauces y playas. Unas acciones que son un buen reflejo de la cada vez mayor sensibilidad colectiva hacia los valores naturales y paisajísticos de los espacios fluviales y marítimos.

Semanas después, los ayuntamientos de los municipios litorales asumieron las tareas de limpieza de las playas con el fin de poderlas tener a disposición de los visitantes lo antes posible, pensando en la llegada de visitantes de Semana Santa y, especialmente, en la temporada turística de verano. Estas tareas fueron responsabilidad de las brigadas municipales y de las empresas concesionarias del servicio de limpieza y recogida de residuos. En una primera fase, los trabajos se centraron en las playas urbanas y posteriormente, se realizaron en los espacios naturales (la Pletera, la Gola del Ter y Mas Pinell). Por otra parte, la ACA ha sido la encargada de retirar el arbolado acumulado en los cauces de los cursos fluviales, aunque la ingente tarea de valoración de los efectos y el estado de alarma convertido raíz de la pandemia del COVID19 ha retrasado el desarrollo de todos estos trabajos.

La reconstrucción de los desperfectos causado por Gloria y el retorno lo antes posible a la normalidad fue la principal preocupación del ayuntamiento de Torroella de Montgrí-l'Estartit, que asumió, en primera instancia, los gastos derivados de la limpieza de los espacios y equipamientos públicos, el restablecimiento de los servicios básicos y la limpieza de las playas. A continuación, se tramitaron las solicitudes de ayudas que se convocaron desde las diferentes escalas de la administración pública.

Por otro lado, el ACA se responsabilizó del trabajo y el coste de la retirada del material vegetal muerto acumulado en los cauces del Ter y de la reparación de las infraestructuras de protección hidráulica afectadas, como la mota del Ter.

6. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de los tres componentes propuestos por el IPCC (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) para el conjunto del litoral mediterráneo peninsular y los dos casos de estudio de la Costa Brava confirmarían que a pesar del aumento continuado de la exposición podemos hablar de una disminución en la vulnerabilidad de estos espacios turísticos ante el riesgo de inundación. Esta dinámica, que no es exclusiva de los espacios turísticos, sino que va acorde con las tendencias detectadas en otras partes de los países desarrollados (Neumayer and Barthel, 2011; Prapotny et al., 2018), encuentra su máxima expresión en los espacios turísticos del litoral mediterráneo peninsular. Es en este litoral mediterráneo donde confluye el aumento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones y temporales de mar (vinculados al cambio climático) con un intenso y rápido proceso de urbanización y la acumulación de personas, actividades económicas y bienes en espacios inundables (exposición). Si bien las pérdidas económicas por inundación no dejan de aumentar en términos absolutos, estas disminuyen cuando las ponemos en relación con el nivel de riqueza que estos espacios generan (Barredo et al, 2012). El análisis de la capacidad de adaptación nos ha mostrado que las grandes obras de control de inundaciones (embalses, motas, canalizaciones, etc.) todavía juegan un papel dominante en la protección de personas y bienes ante eventos extremos. Sin embargo, el progreso en la previsión y advertencia de inundaciones junto con la planificación de emergencias también ha sido notable y ayuda a explicar por qué los eventos de gran magnitud como el temporal Gloria causan pocas víctimas humanas de forma directa. Las medidas postcatástrofe también han mejorado, especialmente a través de la generalización de las ayudas públicas y los seguros (Kron, 2015).

El reto más importante continúa residiendo en la reducción de la exposición a las inundaciones a través de la mejora en la planificación de los usos del suelo en los espacios inundables. Este continúa siendo el caballo de batalla en unos municipios de gran atractivo para el crecimiento urbano-turístico. Después de cada nuevo episodio de inundación, la prioridad continúa siendo la reconstrucción de edificios, infraestructuras y equipamientos. Solo a raíz de los últimos episodios, como el Gloria, aparecen voces que, al amparo de la Directiva de inundaciones de 2007, claman por enfoques alternativos en las políticas de adaptación a las inundaciones basadas en la desintensificación de los usos del suelo (Rode, 2014). La constatación que las obras hidráulicas no nos ofrecen una seguridad absoluta, hace necesario de una vez por todas aprender a “convivir con las inundaciones". El programa holandés "Room for Rivers" representa un buen ejemplo de cómo basar la mejora de la gestión de las inundaciones en un enfoque que privilegie el retorno de los espacios inundables al sistema fluvial y marítimo. Unos espacios que pasen a ser más concebidos como recurso que no como riesgo, porque no sólo ayudan a laminar las inundaciones sino porque también nos proporcionan servicios ambientales (Warner et al., 2013; Ollero et al., 2015).

El temporal Gloria podría implicar un punto de inflexión en la gestión de inundaciones porque, muy claramente, por primera vez, el evento se ha asociado con el cambio climático. Además, el creciente reconocimiento de los valores ambientales asociados a los ecosistemas acuáticos también ha contribuido a limitar y ocasionalmente revertir la ocupación intensiva como hemos visto que ha pasado en las actuaciones de la Pletera (l’Estartit) o el Parc dels Estanys (Platja d’Aro). Si las inundaciones serán cada vez más probables con el cambio climático, el reto que tenemos delante no es sólo aprender a convivir con ellas, sino también apreciar los múltiples beneficios que pueden proporcionar si se gestionan adecuadamente.

REFERENCIAS

- AEMET, Agencia Estatal de Meteorología (2015). *Proyecciones climáticas para el siglo XXI en España*. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat
- Albertos, J. M. y Sánchez, J. L. (2014). *Geografía de la crisis económica en España*. Publicacions de la Universitat de València, Valencia.
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. y Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2247-2260.
- Barredo, J. I. (2009). Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 97-104.
- Barredo, J. I., Saurí, D., Llasat, M. C. (2012). Assessing trends in insured losses from floods in Spain 1971–2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1723-1729.
- Burriel, E. L. (2008). La 'década prodigiosa' del urbanismo español (1997-2006). *Scripta Nova: Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, XII(270), 64.
- Christensen, J. H. y Christensen, O. B. (2003). Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421, 805-806.
- Departament d'Interior, Generalitat de Catalunya (2015). *Pla de Protecció Civil per al Risc d'Inundacions a Catalunya (INUNCAT)*. http://www20.gencat.cat/portal/site/interior
- Departament de Territori i Sostenibilitat, Generalitat de Catalunya (2019). http://www20.gencat.cat/portal/site/habitatge
- EEA (European Environment Agency) (2016). *Floodplain Management: Reducing Flood Risks and.Restoring Healthy Ecosystems*. EEA, Copenhaguen. www.eea.europa.eu/downloads/3b859c033b6249c79c9a9fab89b96957/1466520374/floodplain-management-reducing-flood-risks.pdf
- Feliu, P. (2020). Glòria al Ter. *El Punt Avui* (28/01/2020). https://www.elpuntavui.cat/societat/article/5-societat/1730643-gloria-al-ter.html
- Gaja, F. (2008). El 'tsunami urbanizador' en el litoral mediterráneo: El ciclo de hiperproducción inmobiliaria 1996-2006. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, XII(270), 66.
- Gaya, J. (2014). *Barcelona i l'aigua. L'abastament d'aigua a la Barcelona moderna i la seva projecció al futur*. Colección: Estudis. R de recerca. Edicions del Llobregat, Sant Feliu de Llobregat.
- Gaya, J. (2020). El temporal Glòria, què ens ha ensenyat, *Diari de Girona* (27/01/2020). https://www.diaridegirona.cat/comarques/2020/01/28/temporal-gloria-que-ha-ensenyat/1026069.html
- Generalitat Valenciana (2013). *Plan de Acción Territorial del Riesgo de Inundaciones en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)*. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, Valencia. www.citma.gva.es/ca/web/planificacion-territorial-einfraestructura-verde/revision-del-patricova-85207
- GURB, Grup d'Estudis sobre Energia, Territori i Societat (2019). *Evolución de la urbanización en España a través de las imágenes nocturnas de la Tierra, 1992-2012*. https://gurbuab.com/
- IPCC, International Panel of Climate Change (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability: Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* www.ipcc.ch
- Kron W. (2015). Flood disasters – a global perspective. *Water Policy,* 17, 6-24.
- La Vanguardia (24/1/2020). La ACA alega que no desembalsó antes los pantanos porque las previsions eran inciertas. https://www.lavanguardia.com/vida/20200124/473097790715/aca-alega-que-no-desembalso-antes-pantanos-porque-previsiones-eran-inciertas.html
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T. y Kaspar F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75, 273-299.

- Neumayer, E. y Barthel, F. (2011). Normalizing economic loss from natural disasters: a global analysis. *Global Environmental Change*, 21, 13-24.
- Olcina, J. (2009). Hacia una ordenación sostenible de los territorios de riesgo en Europa. En: J. Farinós, J. Romero y J. Salom (Eds.), *Cohesión e inteligencia territorial. Dinámicas y procesos para una mejor planificación y toma de decisions,* 153-182. Publicaciones de la Universitat de Valencia, Valencia.
- Olcina, J. (2017). Incremento de episodios de inundación por lluvias de intensidad horaria en el sector central del litoral mediterráneo español: análisis de tendencias en Alicante. *SÉMATA, Ciencias Sociais e Humanidades*, 29, 143-163.
- Olcina, J., Saurí, D., Hernández, M. y Ribas, A. (2016). Flood policy in Spain: a review for the period 1983-2013. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 25/1, 41-58.
- Ollero, A., Ibisate, A., Granado, D. y Real de Asua, R. (2015). Channel responses to global change and local impacts: perspectives and tools for floodplain management (Ebro River and tributaries, NE Spain. En: P. Hudson y H. Middelkoop (Eds.), *Geomorphic Approaches to Integrated Floodplain Management of Lowland Fluvial Systems in North America and Europe,* 27-52. New York, Springer.
- Paprotny, P., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O. y Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature Communications*, 9, 1985.
- Pascual, J. (2005). Les esllavissades de 1994 a l'Estartit. *La Punxa*, Col·legi Oficial d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics, 39, 26-37.
- Pérez-Morales, A., Gil-Guirado, S. y Olcina, J. (2016). La información catastral como herramienta para el análisis de la exposición al peligro de inundaciones en el litoral mediterráneo español. *EURE*, 42(127), 231-256.
- Perles, M. J. (2010). Apuntes para la evaluación de la vulnerabilidad social frente al riesgo de inundación. *Baetica*, 32, 67-87.
- Pueyo-Ros, J., Ribas, A., Fraguell, R. M. (2017). Uses and Preferences of Visitors to Coastal Wetlands in Tourism Destinations (Costa Brava, Spain). *Wetlands*, 38(6), 1183-1197.
- Pueyo-Ros, J., Garcia, X., Ribas, A., Fraguell, R. M. (2018). Ecological restoration of a coastal wetland at a mass tourism destination. will the recreational value increase or decrease?. *Ecological Economics*, 148, 1-14.
- Ribas, A., Calbó, J., Llausàs, A. y López-Bustins, J. A. (2008). *Avaluació dels efectes del canvi climàtic a la Costa Brava*. Universitat de Girona, Girona.
- Ribas, A. y Serra, D. (2009). Canvi global i riscos naturals. El cas de la Costa Brava. En: C. Barriocanal, D. Varga y J. Vila, *Canvi ambiental global. Una perspectiva multiescalar,* 135-151. Colección Quaderns de Medi Ambient, 1. Documenta Universitaria, Girona.
- Ribas, A., Olcina, J. y Saurí, D. (2020). More exposed but also more vulnerable? Climate change, high intensity precipitation events and flooding in Mediterranean Spain. *Disaster Prevention and Management*, 29(3), 229-248.
- Rode S. (2014). Une Zone d'Aménagement Différé pour rétablir un champ d'expansion des crues. En: H.-J. Scarwell., G. Schmitt y P.-G. Salvador (Dir.), *Urbanisme et inondation: outils de réconciliation et de valorization,* 127-148. Presses Universitaires du Septentrion, colección Environnement et Société.
- Rosenzweig, B. R., McPhillips, L., Chang, H., Cheng, C., Welty, C., Matsler, M., ... & Davidson, C. I. (2018). Pluvial flood risk and opportunities for resilience. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *5*(6), e1302.
- Roset, D., Saurí, D. y Ribas, A. (1999). Las obras hidráulicas en los sistemas fluviales de la Costa Brava: preferencias locales y limitaciones de un modelo convencional de adaptación al riesgo de inundación. *Investigaciones Geográficas*, 22, 79-93.
- Serra, D. (2008). *Anàlisi de l'exposició i la vulnerabilitat al risc d'inundació a les conques del riu Ridaura i la riera de Calonge*. Trabajo de investigación del Doctorado de Medio Ambiente de la Universitat de Girona, Girona.

- Saurí, D., Roset, D., Ribas, A. y Pujol, P. (2001). The “escalator effect” in flood policy: the case of the Costa Brava, Catalonia, Spain. *Applied Geography*, 21, 127-143.
- Tanoue, M., Hirabayashi, Y. y Ikeuchi, H. (2016). Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. Nature Scientific Reports 6, 36021. Nature Publishing Group, Berlin.
- Tena, V. (2020). L'endemà de Gloria: sis mesos després del temporal. *El Temps*, 20 de julio de 2020. https://www.eltemps.cat/article/10873/lendema-de-gloria-sis-mesos-despres-del-temporal
- UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction y CRED, Centre de Recherche d’Épidémologie des Desastres (2019). *The human cost of weather related disasters*. www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf.
- Vera Rebollo, J. F. (2003). Riesgos naturales en la actividad turística. *Áreas. Revista Internacional de Ciencias Sociales*, 23, 159-176.
- Visser, H., Petersen, A. C. y Ligtvoet, W. (2014). On the relation between weather-related disaster impacts, vulnerability and climate change. *Climatic Change*, 125(3-4), 461-477.
- Warner, J. F., Van Buuren, A. y Edelenbos, J. (2013). *Making Space for the River: Governance Experiences with Multifunctional River Flood Management in the US and in Europe*. IWA Publishing, Chicago.

LA RESPONSABILIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN EN SUPUESTOS DE DAÑOS ORIGINADOS POR INUNDACIONES: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Jesús Conde Antequera
Profesor Titular de Universidad, Universidad de Granada, España
jesusconde@ugr.es
https://orcid.org/0000-0002-1505-3127

RESUMEN

La creciente ocupación de suelo para usos urbanísticos se ha traducido en una mayor exposición de determinados usos o actividades vulnerables, y de personas, a los peligros de inundación. En este proceso de urbanización desmesurada, a veces especulativa, son diversas las instancias públicas que ven implicadas sus competencias administrativas para tratar de conjugar las necesidades de desarrollo urbanístico con las de prevención ambiental y las de seguridad de las personas y de los bienes. Nos planteamos ahora si, en los casos en que inundaciones debidas a esas lluvias torrenciales produzcan daños patrimoniales o personales en áreas sensibles expuestas a las mismas, los daños han de ser asumidos por los perjudicados o si podría entenderse que dichas Administraciones públicas deben indemnizar a las víctimas de estos fenómenos. Asimismo, habida cuenta del incremento de episodios y de la intensidad de las inundaciones que están derivando del actual cambio climático, debemos considerar si los mandatos de adaptación y resiliencia ante los efectos del cambio climático que plantean los Objetivos de Desarrollo Sostenible han de tener algún efecto sobre las posibles responsabilidades administrativas en este ámbito o, por el contrario, serían causa para la exclusión de tales responsabilidades.

1. INTRODUCCIÓN

No es fácil la adopción de una decisión valorativa respecto a cómo y quién ha de asumir el coste de los daños originados por fenómenos naturales y, especialmente, cuando dichos daños se producen no ya sólo por la actividad de la naturaleza, sino que concurre con ésta una posible negligencia humana por la exposición a un riesgo conocido; o conocido al menos en ciertos aspectos. Es cierto que la solidaridad de una sociedad invita inicialmente a repartir entre todos sus miembros el sufrimiento de unos pocos, y para eso se establecen diversos mecanismos jurídicos[1], pero ¿hasta qué punto la sociedad estaría dispuesta a asumir los costes de unos daños que hubieran podido evitarse o reducirse si se hubiese actuado con mayor diligencia por parte de los titulares de las actividades o de los bienes dañados y/o de los responsables de evitarlos? Delimitar las situaciones que pueden plantearse en la práctica para afrontar estos daños derivados de inundaciones no es cuestión jurídica ni técnicamente fácil pero es preciso dar, en todo caso, una adecuada respuesta jurídica. Sobre todo, porque la opción de entender que ha podido, o no, haber negligencias respecto al deber de evitar la exposición a los peligros de inundación es, necesariamente, una opción técnica, variable en función de muchas circunstancias y conocimientos científicos que, si cabe, resulta más incierta aún en la actualidad por

[1] Vid. Conde Antequera (2015:73). La normativa española ha venido fundamentando la reparación de las catástrofes naturales o calamidades públicas no en el principio de responsabilidad sino en el de solidaridad, mediante un régimen de ayudas y subvenciones. Este sistema difiere del de responsabilidad en cuanto a la nota de "integridad" de la reparación o indemnización, que sólo es obligada en el régimen de responsabilidad.

el hecho del cambio climático, cuya realidad es ya es escasamente discutida.

Si a esta difícil decisión añadimos que diversas Administraciones públicas están encargadas de velar por la seguridad de las personas y de garantizar que no se produzca tal exposición de usos o actividades vulnerables al peligro de inundación, queda claro que, al menos, en los casos en que se produzcan estos daños, deberá hacerse un análisis jurídico de cada situación concreta para determinar si las víctimas han de soportar ese daño (con ayudas solidarias, como mucho) o si, por el contrario, dichas víctimas tienen un derecho a ser resarcidas por los daños sufridos.

Esta cuestión nos ha de llevar, consecuentemente, a la necesaria revisión de determinados conceptos fundamentales para la delimitación de dichas responsabilidades, como el concepto de zona inundable, o de técnicas actuales de previsión que se han convertido en herramientas jurídicas en las que se basan las medidas administrativas de prevención, como son los mapas de peligros o de riesgos de inundación, sobre los que se elaboran los planes de gestión de riesgos o de ordenación urbanística, y que adquieren hoy día una nueva dimensión por el hecho del cambio climático. Es evidente que estos conceptos y herramientas técnico-normativas han de influir en la configuración de un sistema adecuado de responsabilidad en tales casos y que dicho sistema de responsabilidad, además, ha de entenderse de conformidad con la transversalidad de esta cuestión. La regulación de los usos y construcciones en zonas inundables no deja de ser una cuestión tangencial, fronteriza y de responsabilidad compartida. Y esa transversalidad, de la que deriva una complejidad normativa, ha dado lugar a una cierta ineficacia práctica a la hora de evitar la implantación de usos y construcciones en zonas con riesgo de inundación.

En todo caso, ante el agravamiento de las situaciones de inundación, por las alteraciones en cuanto a su intensidad y frecuencia derivadas del cambio climático, hemos de replantearnos actualmente no sólo las posibles responsabilidades por los daños que se produzcan a consecuencia de tales inundaciones respecto a usos o actividades cuya exposición al peligro de inundación se lleve a cabo en adelante, sino también respecto a los daños que se produzcan sobre los bienes que ya se encontraban ubicados con antelación en zonas expuestas a dichos peligros .

2. LOS DAÑOS PRODUCIDOS POR INUNDACIONES Y SU AGRAVAMIENTO A CONSECUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

2.1. La naturaleza jurídica de los daños originados por inundaciones

Para determinar la naturaleza jurídica del daño originado por inundaciones hemos de partir del entendimiento de las inundaciones como un fenómeno natural respecto al que, a los efectos de responsabilidad, ha habido una tendencia tradicional a su identificación con supuestos de fuerza mayor, entendiéndose por fuerza mayor, conforme a nuestra jurisprudencia, un hecho de la naturaleza que es impredecible o imprevisible, irresistible e inevitable. Estas notas (impredecibilidad o imprevisibilidad, irresistibilidad e inevitabilidad) son, pues, las tres características que, según la jurisprudencia, identifican a la fuerza mayor.

Ante estos supuestos de daños originados por la naturaleza, la respuesta primaria de la sociedad es la de la solidaridad (hasta donde alcance dicha solidaridad en cada caso), y el Derecho articula mecanismos de ayuda a las víctimas para hacerla efectiva; una ayuda debida más a razones morales y éticas que a razones jurídicas o a obligaciones normativas reales. La “fuerza mayor” es una razón que, normativa y jurisprudencialmente, ha sido y es considerada como excluyente de posibles responsabilidades exigibles por el titular de los bienes jurídicos dañados. Identificar estos fenómenos naturales con supuestos de fuerza mayor, por lo tanto, implica que los daños originados por las inundaciones imprevistas, inevitables e irresistibles serían daños no resarcibles por la vía de la responsabilidad y, salvo por las posibles colaboraciones solidarias, los asumirían las personas que

han tenido la mala suerte de sufrirlos o, en su caso, los seguros suscritos con compañías aseguradoras o el Consorcio de Compensación de Seguros, cuando proceda[2].

Sin embargo, como justificaremos más adelante, la Ciencia permite actualmente obtener un cierto conocimiento sobre la naturaleza y sus fenómenos o, al menos, ofrecer criterios sobre cuál habría de ser la actuación humana para evitar la exposición a ciertos riesgos naturales o bien para reducir la vulnerabilidad ante los mismos, minimizando o eliminando, en tal caso, las consecuencias dañinas de dichos fenómenos. Ese conocimiento previo del daño y la capacidad de valorarlo y actuar preventivamente frente al mismo, sin duda, han de tener una repercusión importante en la teoría de la responsabilidad y en la naturaleza jurídica del daño producido por tales inundaciones, que adquiriría así la característica de antijurídico, por haberse configurado normativa y jurisprudencialmente un deber genérico de evitarlo, y podría ser indemnizable en consecuencia.

En cualquier caso, en la configuración del concepto de daño a efectos de responsabilidades adquiere un valor importante la teoría del riesgo. Ciertamente, en estos supuestos no se generan responsabilidades por la existencia de un riesgo, sino que, en el ámbito de la responsabilidad administrativa patrimonial, es preciso que se produzca efectivamente un daño para que éste sea indemnizable. Pero también es cierto que el concepto técnico de riesgo configura y delimita el alcance del deber de prevención del daño en estos casos y, por lo tanto, delimita también el ámbito o alcance de la responsabilidad administrativa en tales supuestos. En consecuencia, la capacidad de conocimiento del riesgo ha de tener también repercusión en la naturaleza del daño a efectos de responsabilidades administrativas. Así, desde la perspectiva de la teoría del riesgo, hemos de considerar a los daños producidos por inundaciones, al menos en algunos casos o desde cierta perspectiva, como daños previsibles y "evitables". Es posible que no se tenga aún capacidad técnica para saber cuándo se van a producir tales daños y, salvo con poca antelación por las previsiones meteorológicas, sólo los denominados "periodos de retorno" o los datos históricos pueden servir de referencia técnica para prever que dichos daños van a producirse, pero sí que podemos tener certeza de que tales daños se van a producir si en las áreas de peligro de inundación se ubican edificaciones y éstas no resultan invulnerables a la fuerza de las avenidas[3].

Por lo tanto, junto a los daños imprevisibles e "inevitables" que pudieran producirse a consecuencia de inundaciones generadas por fenómenos meteorológicos en lugares en los que no resulta posible preverlos conforme a los conocimientos técnicos del momento, podemos encontrarnos también con situaciones en las que, por las características del terreno y los episodios de inundación históricamente acaecidos sobre ciertos terrenos, es fácil prever, según dichos conocimientos técnicos, que puedan producirse inundaciones y daños en las actividades o usos desarrollados en dicho suelo. En estos últimos casos, cabría la posibilidad de considerar a tales daños como indemnizables, de concurrir los requisitos previstos para la existencia de responsabilidad patrimonial de la Administración, y no tener aplicación la teoría de la fuerza mayor.

[2] Las inundaciones "extraordinarias" han sido consideradas como acontecimientos extraordinarios de los que derivan daños objeto de cobertura por el seguro de riesgos extraordinarios que gestiona el Consorcio de Compensación de Seguros. Véase al respecto el artículo 6.1.a) del R.D.L. 7/2004, de 29 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido del Estatuto Legal del Consorcio de Compensación de Seguros y el artículo 1.1.a) del R.D. 300/2004, de 20 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento del seguro de riesgos extraordinarios.

[3] En este sentido, la Directiva 2007/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, consideraba que las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse pero algunas actividades humanas, como el incremento de los asentamientos humanos y los bienes económicos en las llanuras aluviales y la reducción de la capacidad natural de retención de las aguas por el suelo, además del cambio climático, están contribuyendo a aumentar las probabilidades de que ocurran, así como de su impacto negativo.

2.2. Los diferentes ámbitos territoriales afectados por las inundaciones y la incidencia de su clasificación y calificación sobre la naturaleza jurídica del daño

También es preciso tener en cuenta, a la hora de configurar un posible régimen de responsabilidad por daños derivados de inundaciones, la consideración jurídica del suelo en el que se detecta el riesgo de inundación.

Gran parte del suelo inundable es el constituido por los cauces de los ríos o corrientes naturales y sus riberas (hasta donde alcanza la máxima crecida ordinaria del río) y por el lecho de los lagos, lagunas y embalses superficiales en cauces públicos, que están incluidos en el denominado "dominio público hidráulico". Y, como bienes de dominio público, son objeto de un régimen jurídico especial de policía administrativa, caracterizado esencialmente por las limitaciones de uso que para estos bienes quedan establecidas en el Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA) y el Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RDPH)[4], y que, indudablemente, determinan y limitan las opciones de efectuar construcciones sobre el mismo. En dichas zonas de dominio público, e incluso en los cauces de dominio privado que puedan existir (artículo 5 del TRLA), no está permitida la construcción de obras cuya destrucción por la fuerza de las avenidas pudiera ocasionar daños a personas o cosas.

En los márgenes de los ríos, además, se delimitan normativamente una zona de servidumbre, de 5 metros, y una zona de policía, de 100 metros, ambas desde la línea definida por la máxima crecida ordinaria de las aguas, a las que se otorga un régimen específico de protección. A partir de esta línea de máxima crecida ordinaria, con afección a la zona de servidumbre y a la de policía, pero también a otros, los terrenos pueden ser inundados cuando se producen crecidas extraordinarias. En estos casos, el TRLA define dichos terrenos como "zonas inundables"[5], cobrando así especial relevancia, para distinguir el ámbito territorial de una zona inundable de lo que sería el cauce o ribera del río, por lo tanto, los conceptos de crecida ordinaria o extraordinaria, que son conceptos técnicos vinculados a otro concepto técnico: los periodos de retorno[6].

Dentro de las zonas inundables, en la zona de servidumbre se establecen limitaciones de usos de los propietarios de los terrenos con el objeto de preservarlos de los posibles daños por inundaciones; especialmente, se regula en el artículo 7.3 del RDPH, la no posibilidad de edificación en esta zona con carácter general y sólo excepcionalmente mediante autorización en casos muy justificados. En la zona de policía también se condiciona el uso del suelo y el desarrollo de actividades, estableciendo el artículo 9.1 RDPH los usos que quedan "condicionados" en esta zona, incluyendo expresamente las construcciones de todo tipo, tengan carácter definitivo o provisional. Luego, aunque en el cauce, ribera y zona de servidumbre está prohibida la construcción, en la zona de policía está condicionada, pero no prohibida, si bien este condicionamiento dificulta muchísimo que pueda destinarse el suelo a un uso edificatorio. Cualquier construcción que pretenda hacerse en este suelo debe someterse, eso

[4] Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas y Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, respectivamente.

[5] Por zona inundable, el art. 11 del TRLA entiende "los terrenos que pueden resultar inundados durante las crecidas no ordinarias de los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos".

[6] En este sentido, el artículo 14.1 del RD. 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, define las zonas inundables como "*las delimitadas por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de quinientos años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas, a menos que el Ministerio de Medio Ambiente, a propuesta del organismo de cuenca fije, en expediente concreto, la delimitación que en cada caso resulte más adecuada al comportamiento de la corriente*". También el art. 3.m) del R.D. 903/2010 se refiere a éstas como "*los terrenos que puedan resultar inundados por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de 500 años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de serios de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas en los lagos, lagunas, embalses, ríos o arroyos, así como las inundaciones en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición*".

sí, a la autorización que prevé el RDPH y comprobación de la idoneidad por la Administración hidráulica[7]. Y dentro del concepto de zona inundable, el artículo 9.2 del RDPH establece que esa zona de policía puede extenderse para incluir también la "*zona de flujo preferente*" [8] con el objeto de reducir el riesgo de daños en casos de avenidas. Conforme a este texto normativo, en las zonas de flujo preferente sólo podrán ser autorizadas por el organismo de cuenca aquellas actividades no vulnerables frente a las avenidas y siempre que no supongan una reducción significativa de la capacidad de desagüe de la vía.

En conclusión, desde la perspectiva de la normativa de aguas, dentro del concepto de zonas inundables hemos de considerar la existencia de estas diferentes categorías de terrenos inundables con un régimen diverso respecto a la posibilidad de edificación en las mismas, regulado por dicha normativa, y cuya observación y cumplimiento se asigna competencialmente a los organismos de cuenca. Como decíamos, una delimitación de categorías de suelo fundamentada en la línea de máximas crecidas ordinarias que configura el suelo correspondiente al dominio público hidráulico constituido por el cauce y la ribera de los ríos, a partir de la cual se extienden las demás.

Ahora bien, frente a esta delimitación básica de los terrenos inundables realizada por la normativa de aguas, es preciso hacer algunas consideraciones. En primer lugar, que la propia normativa de aguas admite la posibilidad de modificación, por razones naturales o por obras legalmente autorizadas, de los cauces sobre los que se articula posteriormente este concepto de zonas inundables (artículo 8 TRLA). En tales casos de modificaciones artificiales de los cauces, es evidente que las zonas de riesgo de inundación van a verse alteradas respecto de las que inicialmente había configurado la naturaleza, creándose a raíz de dichas obras, por la propia acción del hombre, zonas inundables en terrenos que antes no lo eran, y trasladando la posibilidad de ocurrencia de daños a otras zonas por una decisión, normalmente, administrativa. En segundo lugar, hemos de partir del hecho de que la consideración de una zona como inundable, desde la perspectiva de la normativa de aguas no implica que no puedan desarrollarse construcciones sobre la misma. No será posible llevar a cabo tales construcciones en el dominio público hidráulico y en la zona de servidumbre, pero si en la zona de policía, condicionada a la autorización de la Administración hidráulica en este caso (art. 9.1 RDPH); también en la zona de flujo preferente (bajo autorización del organismo de cuenca y acreditación de su invulnerabilidad ante la avenida); y, por supuesto, en las demás zonas inundables en periodos de crecidas extraordinarias que no sean zona de policía ni de flujo preferente, sin que en estos casos se establezca limitación alguna por parte de la normativa de aguas. Lo cual nos lleva en consecuencia a plantearnos o valorar si este suelo con riesgo de inundación que no es dominio público ni zona de servidumbre puede ser objeto de uso urbanístico y susceptible de edificación y, en tal caso, de proceder tal uso urbanístico, si las construcciones realizadas sobre ellos estarían sujetas a ciertas limitaciones en atención a la inundabilidad del terreno. Además, esa posibilidad de entender como zonas inundables a terrenos que no forman parte del Dominio Público Hidráulico, tendrá importantes consecuencias a efectos de competencias y responsabilidades administrativas, ya que, si bien todo este dominio y su protección es competencia de la Administración hidráulica, no así otro lo es respecto a ese suelo inundable que no sea incluible en estas categorías expresamente delimitadas en la normativa de aguas cuya responsabilidad se atribuye expresamente a la Administración hidráulica. En tercer lugar, será preciso recordar la existencia de situaciones en que las zonas inundables estén insertas en la ciudad y en suelo

[7] En este sentido, el art. 78 RDPH exige autorización previa del organismo de cuenca para cualquier construcción en zona de policía.

[8] Por zona de flujo preferente entiende el artículo 9.2 del RDPH "*Aquella zona constituida por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe, y de la zona donde, para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas*". Este precepto regula también los criterios técnicos para delimitar los riesgos a los que se refiere en la definición y también remite a la información de índole histórica y geomorfológica existente.

urbano ya consolidado, y ya edificadas con anterioridad a la entrada en vigor de la normativa mencionada; o, incluso, que puedan haber sido clasificadas como suelo urbanizable conforme al planeamiento urbanístico vigente, aun siendo inundables, por decisión política. Lo cual nos llevaría a plantearnos qué ocurriría en los casos en que resulten daños por inundación en estas zonas edificadas dentro de las ciudades o si resultan dichos daños en las zonas que van a ser urbanizadas y edificadas conforme al plan, siendo zonas en principio inundables.

Esta categorización de los suelos con peligro de inundación, en el marco de las consideraciones que se han realizado, determinará en cierto modo la naturaleza de los daños producidos por tales inundaciones en cada caso, a efectos de la procedencia de su indemnización o no y, en su caso, de la Administración obligada a indemnizarlos. Por ello, procede delimitar las competencias administrativas sobre estas zonas inundables.

2.3. Los riesgos de inundación como "impactos derivados del cambio climático" y sus consecuencias respecto al tratamiento jurídico del suelo afectado

Aunque siempre se han producido inundaciones, hemos de tener en cuenta que es un hecho constatado[9], y ya no discutido, que la frecuencia e intensidad de las lluvias torrenciales que originan inundaciones se ha visto alterada por el cambio climático y que uno de los principales impactos del cambio climático es el aumento de la peligrosidad por inundaciones y los riesgos asociados a éstas. En consecuencia, podemos considerar que los daños producidos por estas inundaciones, "anormales" conforme a los criterios anteriores pero posibles conforme a las nuevas circunstancias climáticas, podrían considerarse "impactos derivados del cambio climático". Esta consideración de tales daños como "impactos derivados del cambio climático" tiene importancia respecto a su tratamiento jurídico, pues calificarlos como tales supone incluirlos en el ámbito de aplicación de la normativa sobre el cambio climático que actualmente está en elaboración, y también de la ya aprobada. En tal sentido, por ejemplo, el régimen aplicable a tales impactos vendrá próximamente establecido en la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (ahora en proyecto[10]) y, conforme a la misma, la planificación sobre tales impactos correspondería al Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) al que se refiere dicho proyecto de Ley.

La aplicación de este nuevo régimen jurídico supondría la necesidad de tener en cuenta las previsiones de este Plan y de sus interacciones a la hora de determinar posibles responsabilidades por la producción de estos daños.

Por otro lado, el cambio climático y la alteración que conlleva de estos fenómenos climáticos tienen una importante consecuencia, a efectos de competencias y responsabilidades, respecto a la categorización del suelo inundable. Es decir, si el concepto de zona inundable se fundamenta en la valoración del alcance de las crecidas extraordinarias con base en estudios técnicos (geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos) referidos a unos periodos de tiempo (periodos de retorno), o en

[9] Véase al respecto el Informe científico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Grupo de Trabajo II, que se refiere a los cambios negativos en cuanto a la intensidad y frecuencia de los eventos extremos (inundaciones también) y sus efectos sobre las ciudades derivados del incremento de la temperatura global. Dicho informe expresa que no admiten dudas la realidad del cambio climático y su influencia y el aumento de evidencias de este hecho y de sus consecuencias, entre las que se encuentran estos cambios de intensidad y frecuencia de inundaciones. Asimismo, en el prólogo de la Guía metodológica "Medidas para la mitigación y la adaptación al cambio climático en el planeamiento urbano", elaborada por la Red Española de Ciudades por el Clima y la Federación Española de Municipios y Provincias, con la colaboración del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, se expone cómo se ha constatado que en la Península Ibérica los fenómenos meteorológicos extremos se están produciendo con más frecuencia y los escenarios consecuentes prevén más alteraciones.

[10] El referido proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición energética es accesible en la página web https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/proyectodeleydecambioclimaticoytransicionenergetica_tcm30-509256.pdf, del Ministerio para la Transición Económica y el Reto Demográfico.

documentos y evidencias históricas, y el cambio climático está suponiendo una alteración de las frecuencias e intensidades respecto a la información así obtenida y a las referencias históricas, se nos plantea el problema de la validez de esta información para una adecuada o correcta delimitación de las zonas inundables y, en consecuencia, la necesidad de revisión de dicha información básica y el replanteamiento del posible régimen de responsabilidad en estos casos.

3. LA CONCURRENCIA DE COMPETENCIAS ADMINISTRATIVAS EN RELACIÓN CON LA PREVENCIÓN DE DAÑOS DERIVADOS DE FENÓMENOS NATURALES

Con estas consideraciones anteriores como base, nos planteamos ahora si en los casos de riesgos de inundaciones, conforme a los conocimientos técnicos actuales, las diversas Administraciones públicas están obligadas a actuar para evitar los daños inherentes a tales inundaciones y si, en caso de negligencia o mal desempeño de dichas obligaciones, dichas Administraciones estarían obligadas a indemnizar a los perjudicados por aquéllas. En definitiva, debemos valorar la posibilidad de que los perjudicados por una inundación adquirieran un derecho a indemnización por un mal funcionamiento de la Administración pública y, consecuentemente, qué Administración sería la obligada a responder en tales casos: si lo sería el Ayuntamiento que ha otorgado la licencia de edificación o de uso en una zona con riesgo de inundación, si la Administración hidráulica en cuanto encargada de la evaluación de los riesgos, si la Administración competente en materia de protección civil, que debe garantizar la protección de las personas, o la Administración autonómica, en cuanto competente para la ordenación territorial y para la aprobación de los Planes Generales de Ordenación Urbana, en los que se basan las licencias de edificación, y la autorización de actividades de utilidad pública en suelo no urbanizable. La transversalidad de la materia, como decíamos, y la concurrencia competencial consecuente sobre un mismo ámbito territorial, desde diversas perspectivas, complica en esencia el régimen de protección y el de responsabilidad, en su caso.

Asimismo, hemos de valorar si la futura normativa sobre cambio climático puede tener incidencia o alterar el actual régimen competencial en relación con esta materia y si las nuevas obligaciones derivadas de la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible pueden también repercutir, y en qué modo, en dicho régimen competencial y de responsabilidad. No es, por lo tanto, una cuestión exenta de enjundia y complejidad jurídica la de la determinación de las posibles responsabilidades administrativas en supuestos de daños sufridos por particulares a consecuencia de inundaciones. Procederemos inicialmente, por lo tanto, a delimitar los aspectos competenciales respecto a las diferentes entidades públicas implicadas, al menos, respecto a la delimitación de las zonas con riesgo de inundación y respecto a la ubicación de construcciones o actividades en dichas zonas.

3.1. Las competencias administrativas para la delimitación de las zonas inundables

Siendo las inundaciones fenómenos hidrológicos, y puesto que una buena parte del suelo afectado por éstas tiene la consideración de dominio público hidráulico, es obvio que encuentren tratamiento en la normativa sobre aguas y que las Administraciones con competencias en esta materia también adquieran, desde dicha normativa, funciones y obligaciones de prevención de los daños que pueden generar estas inundaciones si bien, salvo en cuanto se refiere a las obligaciones derivadas del régimen de policía del dominio público, esta normativa involucra continuamente a otras Administraciones en este proceso de configuración del régimen de prevención frente a inundaciones; principalmente, a las Administraciones con competencias en materia de protección civil y de ordenación territorial o urbanística.

La Directiva 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación[11] estableció

[11] Directiva 2007/60, de 23 de octubre, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. La transposición de esta Directiva al ordenamiento español se hizo por R.D. 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de

unas obligaciones a desarrollar en tres fases para lograr el objetivo de la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. En una primera fase, la Administración hidráulica quedaba encargada de realizar una *evaluación preliminar del riesgo de inundación* (EPRI) e *identificación de las Áreas de riesgo potencial significativo de inundación* (ARPSI). Esta labor consistió en determinar las zonas con riesgos de inundación significativos. Para ello, se contaba con la información sobre inundaciones históricas y estudios de zonas inundables, datos sobre los suelos inundables ocupados y sobre las infraestructuras realizadas para evitar dichos riesgos y ya en ese momento se hace referencia también en la Directiva a la necesidad de considerar la alteración que sobre esos datos podía suponer el impacto del cambio climático. Seguidamente, y sobre la base de esta evaluación preliminar e identificación de áreas de riesgo potencial, se estableció la obligación de elaboración de los *mapas de peligrosidad* y *mapas de riesgo de inundación* para cada ARPSI. Estos mapas son instrumentos de delimitación cartográfica de las zonas inundables y de identificación de los daños potenciales de la posible inundación en tres escenarios delimitados por el R.D. 903/2010 (probabilidad alta, probabilidad media y probabilidad baja, en función de los periodos de retorno tenidos en cuenta como información básica para la elaboración de dichos mapas)[12]. En tercer lugar, sobre la base de estas ARPSI, en el ámbito de cada demarcación hidrográfica, se le encarga la elaboración de los *Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI)* con objeto de coordinar la actuación de todas las Administraciones públicas a efectos de disminuir los riesgos de inundación y reducir las consecuencias negativas. Estos planes contienen "programas de medidas" a aplicar por cada administración en el ámbito de sus competencias y, entre tales medidas, se contempla la de la incorporación a los planes de ordenación territorial y urbanística de limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables en sus diferentes escenarios, así como el establecimiento de criterios para la clasificación como no urbanizable del suelo afectado o para la construcción de edificaciones en las zonas inundables.

El R.D. 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, asignó la obligación de realizar tal evaluación preliminar del riesgo de inundación a los organismos de cuenca (si bien en colaboración con las autoridades de Protección civil de las Comunidades Autónomas y de la Administración General del Estado) o a sus correlativos autonómicos en las cuencas intracomunitarias (artículo 7), evaluación que se dispuso que se había de realizar a partir de los datos históricos disponibles y, sobre todo, de la información suministrada por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables[13] y por las Administraciones competentes en la materia. Dicha evaluación preliminar, que sería aprobada por el Ministerio, requería previamente asimismo informe de la Comisión Nacional de Protección Civil. Asimismo, encarga a los organismos de cuenca y Administraciones competentes en las cuencas intracomunitarias la elaboración de los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación (artículo 10.1), que serán los que constituyan posteriormente la información fundamental para la confección de los Planes de gestión del riesgo de inundación. Estos mapas de peligrosidad y de riesgos de inundación constituyen la base, por lo tanto, del conocimiento de las zonas de riesgo de inundaciones y de todas las medidas de prevención que puedan adoptarse en los respectivos planes. Así, por ejemplo, los objetivos y medidas de protección contra las inundaciones que se establezcan en los Planes de gestión del riesgo de inundación partirán de esta información y, aunque el artículo 13 del Decreto 903/2010 establece que la inclusión de los programas

inundación.

[12] El mapa de riesgos tiene un valor normativo y ejecutivo (no es meramente consultivo), por lo que limita la discrecionalidad del planeamiento sujetándola a criterios técnicos. Los documentos de consulta del segundo ciclo (2019) referentes a estos mapas de peligrosidad y riesgo de inundación en las diferentes demarcaciones hidrográficas pueden consultarse en: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/mapa-peligrosidad-riesgo-inundacion/Mapas-peligrosidad-segundo-ciclo-2019.aspx

[13] El artículo 14 del RDPH prevé la creación de un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables por parte del Ministerio en colaboración con Comunidades Autónomas y Entidades Locales, con base en los estudios de inundabilidad realizados por el ministerio y los organismos de cuenca.

de medidas incorporados a este plan, de elaboración conjunta, por cada administración competente en cada caso, no eximirá en ningún caso de la responsabilidad específica que tiene asumida cada administración dentro del reparto de competencias legalmente establecido, es evidente que dichos programas se han debido confeccionar con base en la información suministrada por estos mapas elaborados, en definitiva, bajo los auspicios de la administración hidrológica.

Por otro lado, desde la perspectiva de la seguridad, como objetivo de la Protección Civil y para dar cumplimiento a estas obligaciones de garantía de seguridad[14], se establece la obligación de la denominada "Red Nacional de Información sobre Protección Civil" de elaborar el Mapa nacional de Riesgos de Protección Civil, como instrumento que permite identificar las áreas geográficas susceptibles de sufrir daños por emergencias o catástrofes, y configura los Planes de protección civil (Plan Estatal General, los Planes Territoriales, de ámbito autonómico o local, los Planes Especiales y los Planes de Autoprotección), como planes que deberán contener programas de información y comunicación preventiva y de alerta que permitan a los ciudadanos adoptar las medidas oportunas para la salvaguarda de personas y bienes. Concretamente, el Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, determina en su apartado 6 que el riesgo de inundaciones será objeto de Planes Especiales en aquellos ámbitos territoriales que lo requieran[15]. Y en su apartado (*Disposiciones generales)* establece que estos planes, en su elaboración, incluirán la identificación y análisis del riesgo y la evaluación de sus consecuencias (apartado a), la zonificación del riesgo (apartado b) y la planificación de medidas específicas, tanto de protección, como de carácter asistencial a la población (apartado h).

Sin embargo, el artículo 28.2 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (LPHN) se refiere a "las Administraciones competentes" como las *encargadas de delimitar las zonas inundables teniendo en cuenta los estudios y datos disponibles que los Organismos de cuenca deben trasladar a las mismas, de acuerdo con lo previsto en el artículo 11.2 de la Ley de Aguas. Para ello contarán con el apoyo técnico de estos Organismos y, en particular, con la información relativa a caudales máximos en la red fluvial, que la Administración hidráulica deberá facilitar*".

La cuestión de quién es la administración encargada de delimitar las zonas inundables derivada de este artículo (si la Administración Hidráulica o la competente en materia de ordenación territorial o para planificación urbanística), es compleja, pero ha de entenderse resuelta en favor de las administraciones competentes en materia de ordenación territorial y urbanística si recordamos que el artículo 11.2 del TRLA remitía expresamente a este artículo 28.2 LPHN y que aquél establecía que "*los organismos de cuenca darán traslado a las Administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo de los datos y estudios disponibles sobre avenidas, al objeto de que éstos se tengan en cuenta en la planificación del suelo y, en particular, en las autorizaciones*

[14] Téngase en cuenta que la seguridad se ha considerado fundamento de la obligación de actuación administrativa para evitar la exposición a riesgos naturales. Véase, por ejemplo, la SAN de 4 abril de 2001 (rec. 245/2000): la actividad administrativa de limitación de usos en el planeamiento para evitar los usos residenciales o de actividades que conlleven una exposición al peligro que determine la existencia de riesgo es una actividad debida con fundamento en la seguridad pública.

[15]La Directriz Básica de planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, aprobada por Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de interior, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, establece los requisitos mínimos de los Planes Especiales de Protección Civil sobre riesgos de inundaciones. En el punto 2.2.1 de la Directriz – Al referirse a l análisis de las zonas inundables del territorio a que se refiera cada plan, dicho análisis supondrá identificar y clasificar las áreas inundables en a) zonas de inundación frecuente (avenidas con periodo retorno 50 años); b) ZI Ocasional (entre 50 y 100 años); y ZI excepcional (entre 100 y 500 años). Y en el punto 2.2.2. al referirse al análisis de riesgos por inundaciones, dice que éste tendrá por objetivo la clasificación de las zonas inundables en función del riesgo y la estimación, en la medida de lo posible, de las afecciones y daños que puedan producirse por la ocurrencia de las inundaciones en el ámbito territorial de la planificación, con la finalidad de prever diversos escenarios de estrategias de intervención en casos de emergencia. Clasificando las zonas inundables por razón del riesgo en Zonas A de riesgo alto, Zonas B de riesgo significativo y Zonas C de riesgo bajo (art. 2.2.2. de la Directriz).

de usos que se acuerden en las zonas inundables". Es decir, según la LPHN, la delimitación de las zonas inundables ha de hacerse en los correspondientes planes de ordenación territorial[16] y urbanística, si bien con base en los datos, estudios, mapas y apoyo técnico de los organismos de cuenca y, recordemos también, los planes de protección civil ante riesgos de inundaciones[17]. Las Administraciones hidráulicas son pues las encargadas de dirigir la elaboración de los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación, de los que se servirán posteriormente los planes de gestión de riesgos de inundación que contendrán ya una delimitación de las zonas inundables y los potenciales daños que pudieran ocasionar las inundaciones, pero serán los planes de ordenación territorial y los planes urbanísticos los que concreten las determinaciones sobre inundabilidad en las zonas incluidas en su ámbito y delimiten sobre el territorio correspondiente, teniendo en cuenta otras circunstancias, las zonas de riesgo de inundación[18].

Junto a esta obligación de delimitar en el planeamiento territorial y urbanístico las zonas inundables, en la elaboración de estos planes se establecen otros condicionamientos específicamente relacionados con los riesgos de inundación[19]. Así, por ejemplo, el artículo 25.4 TRLA condiciona el contenido de los planes urbanísticos al informe de los organismos de cuenca en cualquier materia que afecte a las aguas continentales, en cuanto a los usos permitidos en terrenos de dominio público hidráulico y sus zonas de servidumbre y policía (coincidentes en gran medida con zonas inundables), incluyendo las zonas de flujo preferente cuando la zona de policía se haya ampliado para integrarlas.

Dichos informes se redactarán sobre la base de los Planes hidrológicos de demarcación y de las "planificaciones sectoriales aprobadas por el Gobierno", lo que significa que han de tener en cuenta también a los PGRI[20].

Otra cuestión es que, correspondiendo a la Administración competente para la elaboración de los planes territoriales o urbanísticos la delimitación territorial de las zonas inundables, el informe de la Administración hidráulica sobre la ordenación urbanística que se haga de las zonas inundables sea o no vinculante. En el artículo 25.4 del TRLA no se especifica tal carácter vinculante, por lo que cabrían ciertas dudas[21], pero, en cualquier caso, dicho informe podría tener repercusión en las determinaciones adoptadas por la Administración obligada a asumir las posibles responsabilidades derivadas de una incorrecta delimitación de la zona de riesgo de inundación.

Los que sí vinculan claramente a los planes de ordenación territorial y urbanísticos son los Planes de Gestión de Riesgos de Inundación (PGRI), según determina claramente el artículo 15 del R.D. 903/2010[22], según el cual "*los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación*

[16] Sobre el control del riesgo de inundaciones en la ordenación territorial, véase Molina Giménez, A. (2010:39-72).
[17] Téngase también en cuenta que el Acuerdo segundo de la Directriz Básica de planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones establecía que los análisis de riesgos y la zonificación territorial que queden especificados en los Planes Especiales elaborados, aprobados y homologados, conforme a lo dispuesto en la citada Directriz, serán tenidos en cuenta por los órganos competentes en el proceso de planificación del territorio y de los usos del suelo.
[18] En este sentido, Menéndez Rexach (2015: 38) considera discutible que la delimitación de las zonas inundables deba hacerla la Administración urbanística. Cree que correspondería a la Administración hidráulica al ser la encargada de elaborar estos estudios. Y Sánchez Morón (1990:39), expuso ya la necesidad de coordinación entre todas las planificaciones que afectan al medio físico.
[19] Desde el Decreto 2508/1975 se estableció ya la obligación de que los planes urbanísticos fueran informados por el Ministerio de Obras Públicas en función de "... la seguridad contra las posibles avenidas".
[20] Sobre la naturaleza preceptiva y vinculante de estos informes y su contenido, véase el estudio jurisprudencial de Caro-Patón y Escartín Escudé (2013, 2014 y 2015). También, por ejemplo, la STS 3275/2012, que entiende incluso que en caso de no emitirse tal informe ha de entenderse emitido en sentido desfavorable.
[21] Véase también Escartín (2016: 274 y 275), que hace un exhaustivo estudio sobre la interpretación jurisprudencial al respecto desde la STS 325/2012, de 24 de abril.
[22] Revisada su constitucionalidad por STS 142/2012, de 20 de enero (rec. 450/2010), que fundamenta tal validez en el título de la seguridad pública (art. 149.1.29 CE).

que hagan de los usos del suelo, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los planes de gestión del riesgo de inundación, y reconocerán el carácter rural de los suelos en los que concurran dichos riesgos de inundación o de otros accidentes graves"), si bien, en el procedimiento de elaboración o de revisión de los PGRI, y de sus programas de medidas, cada Administración competente debe aprobar dichos programas en el ámbito de sus competencias antes de la aprobación del PGRI.

3.2. La protección frente a los riesgos de inundación a través del ejercicio de las potestades administrativas de planeamiento urbanístico y del control de los actos de edificación

Los planes son los instrumentos jurídicos adecuados para coordinar la actuación de diversas administraciones con competencias concurrentes o transversales en una materia. El carácter normativo que, salvo excepciones, tienen los planes o muchas de sus disposiciones, conlleva la articulación de derechos y obligaciones en relación con su objeto. La existencia de diversos niveles de planificación en torno a los riesgos de inundación (planes de protección civil, hidrológicos, de gestión de riesgos de inundación, de ordenación territorial, de ordenación urbanística, de ordenación de recursos naturales, planes sectoriales o, próximamente, de adaptación al cambio climático) impone la necesidad de implementar mecanismos de coordinación y de definir normativamente la relación entre dichos planes.

La potestad de planificación es una potestad discrecional, en principio, que puede verse limitada por disposición legal mediante vinculaciones al contenido de otros planes o de informes que, de una u otra forma, se constituyen en formas de coordinación de Administraciones y de limitación competencial. En el caso del planeamiento urbanístico, al que hemos hecho referencia, y del entendimiento de este planeamiento como el encargado de ordenar los usos urbanísticos sobre el suelo, hemos podido comprobar cómo, en cuanto se refieran a las zonas inundables, los informes de la Administración hidrológica pueden incidir sobre la decisión planificadora, de forma vinculante, según algunos autores (Escartín 2015: 275); cuestión de importancia si abordamos esta cuestión desde la perspectiva de la responsabilidad administrativa, pues planificar en contra de un informe de la Administración hidrológica en materia de riesgos de inundación supondría asumir una responsabilidad que, de otro modo, podría imputarse a la Administración hidrológica. En cualquier caso, la discrecionalidad administrativa para la elaboración de los planes de ordenación territorial y, específicamente, los de ordenación urbanística, encuentra ciertas limitaciones debidas a la regulación legal de los riesgos de inundación. Así, por ejemplo, el artículo 21.2.a) TRLS impone la consideración del estado de "suelo rural[23]" para los terrenos "con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación o de otros accidentes graves…"[24]. También el artículo 3.c), con base en el principio de desarrollo sostenible como informador de las políticas públicas relativas a la regulación, ordenación, ocupación, transformación y uso del suelo, impone al planificador urbanístico una política basada en "la prevención adecuada de riesgos y peligros para la seguridad y salud públicas y la eliminación efectiva de las perturbaciones de ambas", el artículo 20.1.c) configura la prevención de los riesgos

[23] Apartado 2. Está en la situación de suelo rural: a) En todo caso, el suelo preservado por la ordenación territorial y urbanística de su transformación mediante la urbanización, que deberá incluir, como mínimo, los terrenos excluidos de dicha transformación por la legislación de protección o policía del dominio público, de la naturaleza o del patrimonio cultural, los que deban quedar sujetos a tal protección conforme a la ordenación territorial y urbanística por los valores en ellos concurrentes, incluso los ecológicos, agrícolas, ganaderos, forestales y paisajísticos, así como aquéllos con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación o de otros accidentes graves, y cuantos otros prevea la legislación de ordenación territorial o urbanística.

[24] Olcina (2007:158) ya observaba cómo el Reglamento de Planeamiento Urbanístico de 1978 se refiere a la obligación de incluir en la memoria del PGOU un documento de información básica con las características naturales del territorio. Más determinante y restrictivo para la posibilidad de elección era el artículo 9 de la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen de suelo y valoraciones, que establecía el carácter reglado de la clasificación como suelo no urbanizable de los terrenos inundables. También González Varas (2005:121) y Menéndez Rexach (2006:182) son partidarios de la consideración de suelo no urbanizable del que sea suelo considerado con riesgo.

naturales como criterio básico en la ordenación del suelo y el artículo 22.2 determina la obligación de incluir un mapa de riesgos naturales del ámbito objeto de ordenación en el informe de sostenibilidad ambiental de los instrumentos de ordenación de actuaciones de urbanización[25].

Queda clara, por lo tanto, conforme a la normativa indicada y a la legislación sobre dominio público hidráulico, la limitación de la discrecionalidad administrativa en el ejercicio de la potestad de planeamiento respecto a los terrenos inundables integrados en el dominio público hidráulico y en la zona de protección, si bien, de lo establecido, puede deducirse que, aun no resultando reglada la obligación de clasificar todo suelo con riesgos de inundación que no sea dominio público hidráulico como suelo no urbanizable, puede considerarse al menos una decisión discrecional técnica y, por lo tanto, el riesgo de inundación se constituye en un criterio técnico de limitación de la discrecionalidad administrativa de planeamiento que, en caso de no excluir dichos suelos de la posibilidad de aprovechamiento urbanístico, deberá justificar dicha decisión en nuevas razones técnicas.

Por otro lado, la ordenación prevista en los planes es la base sobre la que se producirán posteriormente las autorizaciones de usos y edificaciones y, por lo tanto, la que permite a las Administraciones competentes en materia urbanística o ambiental comprobar la adecuación a derecho de las actividades o usos urbanísticos que se pretendan implantar en estas zonas de riesgo. La potestad administrativa de control de la legalidad de estas actuaciones (ejercida a través del instrumento tradicional – la autorización o licencia – y, más recientemente, a través del control posterior a la implantación de la actividad o uso comunicado a la Administración mediante una declaración responsable o comunicación), supone el deber de la Administración de comprobar y valorar el estricto cumplimiento de la normativa y ordenación vigente antes de autorizar o permitir el funcionamiento de una actividad o uso. En este sentido, esta actividad de control por parte de la Administración, específicamente referida en nuestro caso al control de la normativa en materia de prevención de riesgos de inundación, es una actividad debida para la Administración con competencia para el ejercicio de dicho control, que, en caso de incumplimiento de dicho deber de control o mal funcionamiento en cuanto a su ejercicio, puede asimismo generar responsabilidades patrimoniales administrativas si, de dicho mal funcionamiento, se derivasen daños a los particulares. Por ello procede también, a los efectos de nuestro estudio, revisar las cuestiones básicas del régimen autorizatorio que afecta a las zonas inundables y su vinculación al planeamiento a efectos de responsabilidades administrativas.

Conforme a la legislación urbanística y de régimen local vigente, serían los Ayuntamientos las Administraciones competentes para autorizar la edificación en zona de servidumbre del dominio público hidráulico, sin perjuicio de que en la práctica la responsabilidad para dicha autorización se haya limitado a casos muy justificados (artículo 7.3 del RDPH) y trasladado finalmente a los organismos de cuenca en virtud de lo dispuesto en el artículo 78 RDPH, al requerir dicho precepto los mismos trámites que para el caso de la edificación en zona de policía[26]. En las zonas o vías de flujo preferente corresponde a los organismos de cuenca, sin perjuicio de la necesidad de obtener también la correspondiente licencia urbanística o ambiental que corresponda, la autorización de actividades que no resulten vulnerables a inundaciones y que no supongan reducción significativa de

[25] Quizá por el hecho de la inclusión obligatoria de este mapa de riesgos de inundación, no se considera preceptivo el informe de la Administración hidráulica sobre riesgos de inundación en la fase de consultas sobre los instrumentos de ordenación entre los informes preceptivos a que se refiere el artículo 22.3.

[26] En este sentido, este precepto permite al Ayuntamiento autorizar la construcción en zona de policía a través de la licencia de obra, aunque sujeto al informe positivo del organismo de cuenca, ya que, según el apartado 1 de dicho artículo, *".. en todos los casos, los proyectos derivados del desarrollo del planeamiento deberán ser comunicados al organismo de cuenca para que se analicen las posibles afecciones al dominio público hidráulico y a lo dispuesto en el artículo 9*". En relación con ello, el artículo 9.5 RDPH somete la ejecución de cualquier obra en la zona de policía a autorización administrativa previa del organismo de cuenca (sin perjuicio de la que corresponda al Ayuntamiento), pero con carácter previo, lo que condiciona a la urbanística.

la capacidad de desagüe de dichas vías. Y en el resto de zonas inundables que no sean zona de servidumbre, de policía o de flujo preferente hemos de entender que será competente para autorizar la construcción o uso urbanístico la Administración con competencias para la ordenación urbanística, autorización que se otorgará, o no, conforme al planeamiento vigente[27] que habrá tenido en cuenta la información y estudios sobre avenidas elaborados por los organismos de cuenca.

Luego, desde la perspectiva del ejercicio de cualquiera de estas potestades de planeamiento o de policía, la actuación administrativa municipal resulta condicionada por la actuación de la Administración hidráulica. Y, sin embargo, hemos visto que ésta actuación de la Administración hidráulica se basa también en la aportación de las entidades locales para la confección de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundaciones en los que se basará la delimitación de las zonas inundables, y en los mapas de riesgos de protección civil y planes especiales de protección civil regulados por el R.D. 407/1992, en cuya confección participan todas las Administraciones territoriales y sectoriales implicadas.

En cualquier caso, y en palabras de la Audiencia Nacional (SAN 10-7-2014, rec. 314/2012) hemos de tener presente que la delimitación de una zona de riesgo por el plan supone obligar a la Administración competente (la que elabora el plan) a "*realizar un especial esfuerzo para reducir al mínimo las posibilidades de que se produzcan inundaciones en estas zonas de riesgo*".

3.3. ¿Hacia la gestión integrada de los riesgos de inundación?

Ante la diversidad de acciones de planificación relacionadas con los riesgos de inundación, desde la perspectiva de la protección civil, la hidrológica, la específica de gestión de estos riesgos, la territorial y la urbanística, principalmente, y las continuas vinculaciones e interacciones entre éstos, es preciso abordar los riesgos de inundación desde la óptica del principio de coordinación.

La Directiva 2007/60 era ya consciente de esta necesidad al pretender la configuración de un marco normativo común y una actuación coordinada de todas las Administraciones públicas como requisito imprescindible para ser eficaces en la gestión de estos riesgos. En desarrollo de esta idea, el artículo 18 del R.D. 903/2010 se dedicó expresamente a la necesidad de "*cooperación interadministrativa", estableciendo que "la Administración General del Estado, las comunidades autónomas y las administraciones locales tendrán en cuenta el contenido de la evaluación preliminar del riesgo de inundación, de los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación y de los planes de gestión del riesgo de inundación en el ejercicio de sus respectivas competencias, con el fin de garantizar la seguridad de las personas y bienes*", y en su artículo 15 prescribió la necesidad de coordinación entre los PGRI y los planes urbanísticos o de ordenación territorial. No obstante, ya antes el artículo 14 del RDPH preveía la creación de un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables por parte del Ministerio en colaboración con Comunidades Autónomas y Entidades Locales, con base en los estudios de inundabilidad realizados por el ministerio y los organismos de cuenca.

Junto a estas previsiones sobre la necesidad de coordinación entre las diversas tipologías de planes que abordan el riesgo de inundaciones, actualmente en España el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) está preparando un proyecto de "Ley de Cambio Climático y Transición Energética", a la vez que ha publicado la Guía MITECO de "Medidas para la mitigación y la adaptación al cambio climático en el planeamiento urbano"[28]. Este proyecto de Ley

[27] Ello lógicamente tiene incidencia sobre el carácter de la licencia, que ha de ser reglado en el sentido denegatorio cuando el suelo se clasifique como no urbanizable. Véase al respecto, por ejemplo, la STSJ de Murcia 689/2013, de 16 de septiembre.

[28] Elaborada por la Red Española de Ciudades por el Clima, Sección de la Federación Española de Municipios y Provincias, con la colaboración de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

se refiere al *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*, que asimismo se está elaborando, como instrumento de planificación básico para promover la acción coordinada frente a los efectos del cambio climático en España para el periodo 2021-2030. En el borrador[29] se establece el contenido de este plan que, entre otras cosas, habrá de referir las medidas de adaptación orientadas a reducir las vulnerabilidades de los territorios, de las poblaciones y de los sectores socioeconómicos que se hayan detectado tras la identificación y evaluación de impactos previsibles y riesgos derivados del cambio climático para varios escenarios posibles y que define las acciones para fomentar la resiliencia y la adaptación (artículo 15.3). Esta futura Ley contempla además la integración de los riesgos derivados del cambio climático en la planificación y gestión de políticas sectoriales, como la hidrológica, la territorial y la urbanística y de edificación, entre otras, y prevé la elaboración de *Planes sectoriales de adaptación*, que identificarán los principales riesgos derivados del cambio climático sobre un sector, recurso o ámbito en concreto (entendemos que habrá uno específico sobre inundaciones y ordenación urbanística) que, según el proyecto de este Plan, "definirán medidas de respuesta oportunas para evitarlos o limitarlos" y, por lo tanto, una "redistribución" de las posibles responsabilidades derivadas de estos daños producidos por inundaciones.

Además, esta política de coordinación y de adaptación hemos de entenderla en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030[30]. Concretamente, el ODS 11 es el de lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. El punto 11.5 de este objetivo pretende "*De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad*"; y el 11.b se refiere específicamente a la "Reducción de riesgos de desastres en ciudades*: De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover … la adaptación al cambio climático y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres[31] 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles*". Sin duda, el objetivo de hacer resilientes a las ciudades frente a las inundaciones y la previsión de los futuros planes de adaptación al cambio climático, refuerzan la idea, ya avanzada por cierto sector de la doctrina administrativista (Escartín 2016:236), de la gestión integrada de estos riesgos como modelo de gestión eficaz frente a una situación técnicamente compleja y casi inabordable desde la perspectiva de la responsabilidad administrativa.

[29] Véase el borrador del PNACC en https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/PNACC.aspx.
[30] Resolución 70/1 "Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible", aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015, como un plan de acción basado en 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas de carácter integrado e indivisible que conjugan las tres dimensiones del desarrollo sostenible: económica, social y ambiental.
[31] El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 es un acuerdo adoptado en la tercera Conferencia Mundial de Naciones Unidas, celebrada en Sendai (Japón) en 2015 con el objeto de lograr un aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. Este instrumento incluyó, entre sus principios, el de la responsabilidad de los Estados de prevenir y reducir el riesgo de desastres, que ha de ser, además, una responsabilidad compartida por los gobiernos centrales y las autoridades y los sectores y actores nacionales pertinentes. Como prioridad 1 se refiere a la necesidad de comprender mejor el riesgo de desastres en todas sus dimensiones relativas a la exposición, la vulnerabilidad y características de las amenazas.

4. RESPONSABILIDAD PATRIMONIAL DE LA ADMINISTRACIÓN POR DAÑOS ORIGINADOS POR INUNDACIONES: PROBLEMÁTICA DE DELIMITACIÓN DERIVADA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

4.1. Aplicación del régimen de responsabilidad patrimonial a los supuestos de daños derivados de inundaciones

El artículo 106.2 de la Constitución Española y el 32.1 de la Ley 40/2015, de 1 de octubre, del Régimen Jurídico del Sector público (LRJSP), reconocen el derecho de los particulares a ser indemnizados por las Administraciones públicas correspondientes por toda lesión que sufran en cualquiera de sus bienes y derechos, siempre que la lesión sea consecuencia del funcionamiento normal o anormal de los servicios públicos, salvo en los casos de fuerza mayor o cuando se trate de daños que el particular tenga el deber jurídico de soportar de acuerdo con la Ley. Asimismo, en los supuestos de que sean varias las Administraciones públicas que ejerzan una gestión conjunta de la que se deriven tales daños, la referida Ley dispone la determinación de la responsabilidad de cada Administración atendiendo a criterios de competencia, interés público tutelado e intensidad de la intervención, estableciéndose la procedencia de una responsabilidad solidaria frente al particular lesionado cuando no sea posible dicha determinación de forma individualizada (art. 33.2).

Sin entrar a revisar detalladamente todo el régimen de la responsabilidad patrimonial y su concreción en el caso de los daños originados por inundaciones, lo que excedería del objeto de este estudio, nos referiremos seguidamente a tres cuestiones específicas de especial interés para determinación de la responsabilidad en estos supuestos: la consideración de la fuerza mayor como causa de exclusión de la responsabilidad, la dependencia del conocimiento técnico para la determinación de la antijuridicidad del daño y la negligencia o falta de diligencia o actuación como título de imputabilidad de la responsabilidad a la Administración.

En primer lugar, como indicábamos al comienzo de este estudio, para que pueda exigirse responsabilidad a la Administración en un supuesto de daños originados por inundación, sería preciso entender que el caso concreto no pudiera inscribirse en el concepto jurídico de "fuerza mayor". El artículo 32.1 LRJSP, como hemos visto, establece claramente que no procede indemnización en los casos de fuerza mayor por lo que, si las circunstancias concretas del caso hacen que podamos calificar al daño como imprevisible, inevitable e irresistible, entonces no cabría exigir responsabilidad a la Administración. Esta cuestión, sin embargo, no ha sido pacífica en la doctrina ni en la jurisprudencia española, que durante mucho tiempo ha tendido a identificar, con carácter general, los fenómenos meteorológicos extremos (ej. Inundaciones derivadas de lluvias torrenciales) con la fuerza mayor, si bien también ha establecido los criterios que han de entenderse como definidores de la existencia de fuerza mayor: imprevisibilidad e inevitabilidad de los hechos e irresistibilidad frente a los mismos y ha resuelto en ocasiones en favor de la solicitud de indemnización[32].

Ello nos lleva a analizar, por lo tanto, la segunda cuestión anunciada. Luego, si la Administración puede actuar frente a cualquiera de estas situaciones haciendo que se pudieran prever, evitar o resistir, entonces no cabría hablar de fuerza mayor, cobrando relevancia, por lo tanto, el alcance del conocimiento científico y de la tecnología existente a la hora de determinar esas posibilidades de previsión y actuación por parte de la Administración. En este sentido, el concepto de fuerza mayor deviene así en un concepto jurídico indeterminado de delimitación técnica, en definitiva, pues tanto

[32] Sobre la fuerza mayor como causa de exclusión en los supuestos de riesgos naturales, véase Conde Antequera (2015:91 y sig). Véase también Jordano Fraga (2000:43), quien considera incluso que la presencia de un fenómeno conceptuable como fuerza mayor no exonera en todo caso la responsabilidad de la Administración pues, aun siendo imprevisible el hecho, a veces la Administración puede actuar para evitar el daño. Lo que definiría, según Jordano, la responsabilidad, debe ser la relevancia o no de la actuación administrativa. Si la actuación negligente no incidía en la causación del daño, entonces no habría responsabilidad, pero sí en el caso contario. También, Fernández García, (2010:147-156).

la imprevisibilidad (conocimiento o desconocimiento del peligro) como la irresistibilidad (referida a la vulnerabilidad ante el peligro natural) dependerán del conocimiento técnico. Si la técnica permite conocer la existencia del peligro y predecir los potenciales daños, siempre se podría evitar el daño actuando sobre la exposición o sobre la vulnerabilidad. Lógicamente ello tendrá repercusión en la teoría de la responsabilidad en estos supuestos y, por lo tanto, si el conocimiento científico del momento permitiese a la Administración prever o evitar los daños con su actividad exigible, podría entenderse que el particular que ha sufrido los daños no estaba obligado a padecerlos. Por el contrario, como se deduce de lo dispuesto en el artículo 34.1 de la LRJSP, si los daños derivan de hechos o circunstancias que no se hubiesen podido prever o evitar según el estado de los conocimientos de la ciencia o de la técnica existente en el momento en que se produjeron, no cabrá entonces exigir responsabilidad patrimonial. En cualquier caso, se ha venido reconociendo jurisprudencialmente que, en los casos de dependencia técnica, corresponde a la Administración acreditar la insuficiencia de conocimiento científico para eximirla de tal responsabilidad, al igual que le corresponde acreditar la fuerza mayor como causa de exclusión de su responsabilidad.

En tercer lugar, y presupuesto entonces que no concurren en un caso concreto los criterios para la consideración del hecho natural como fuerza mayor y que el conocimiento previo al alcance de la Administración permita a ésta haber adoptado medidas de seguridad y evitación del resultado lesivo, la teoría de la responsabilidad patrimonial exigiría seguidamente un título de imputabilidad a la Administración, bien por acción o por omisión. Así, salvo en los casos en los que la situación de riesgo hubiese sido generada por una actuación administrativa (por ejemplo, la realización de obras públicas de infraestructura o adopción de medidas estructurales, desvíos de cauces, gestión de presas[33], etc., supuestos en los que la imputabilidad estaría definida por dicha acción), serán los supuestos de omisión de deberes de prevención o evitación impuestos a la Administración ante inundaciones naturales los que más problemática jurídica generen respecto a la determinación de la procedencia o no de tales indemnizaciones[34]. Así, será preciso que la Administración viniera obligada a realizar alguna actuación de prevención o evitación del daño, y no cumpliese tal obligación, para que, en el supuesto concreto, pudiera darse el requisito de la imputabilidad de dicho daño a la falta de funcionamiento del servicio público. De este modo, la teoría de la responsabilidad patrimonial objetiva no procede en esencia en estos casos. Si la Administración omite un deber de prevención, entenderíamos que se ha producido un mal funcionamiento (incumplimiento o mal cumplimiento) o una negligencia administrativa, lo cual operaría como título de imputación subjetiva de la responsabilidad a la Administración; es decir, ha de entenderse concurrente una cierta culpa de la Administración por funcionamiento anormal consistente en no haber sido diligente en la adopción de medidas de previsión, prevención o evitación para que proceda dicha responsabilidad.

Conforme a lo expuesto, y teniendo en cuenta entonces lo indicado en los puntos anteriores de este trabajo respecto a las competencias y potestades administrativas, podríamos entender que se da esta situación de mal funcionamiento administrativo que pudiera generar responsabilidad patrimonial, en los siguientes supuestos:

En primer lugar, en la actividad de predicción o por falta de previsión del riesgo natural, concretada principalmente en la elaboración de mapas de peligros y de riesgos, entendiéndose que se produce

[33] Por ejemplo, la actividad de desembalse de agua de presas y embalses, supuesto en el que jurisprudencialmente se ha reconocido responsabilidad patrimonial administrativa en supuestos de mala previsión o gestión. La jurisprudencia ha considerado que la Administración debe gestionar adecuadamente y regular el caudal de los embalses ante las previsiones meteorológicas, evitando que se encuentren los embalses al límite de su capacidad cuando llegan las lluvias (ej. SAN de 8-10-2014 (rec. 8020/2012).

[34] Vid. Esteve (1999:59), quien considera que el control y eliminación de riesgos se ha considerado como una función característica del Estado (poderes públicos), para garantizar la seguridad, lo que es una razón de la propia existencia del Estado, concluyendo la atribución genérica a la Administración del deber de garantizar la seguridad.

este mal funcionamiento si dichos mapas no están elaborados o no están bien elaborados. El conocimiento del riesgo es imprescindible para una correcta ordenación de usos que evite la exposición de los vulnerables a los peligros naturales y podría entenderse un mal funcionamiento administrativo, que diese lugar a responsabilidad de la Administración, el que ésta haya errado en la detección del peligro. Teniendo en cuenta lo que hemos visto sobre la elaboración de los mapas de peligros y riesgos de inundación, en estos casos podría tratarse de una responsabilidad conjunta de las diferentes Administraciones que participaron en la elaboración de dichos mapas que no plasmaban el riesgo existente y que era detectable conforme a los datos y conocimientos técnicos existentes. La problemática podría trasladarse entonces al nivel de precisión exigible a la Administración en la confección de estos mapas, concretado en la escala de los mismos. También podríamos considerar incluibles en este supuesto el caso de la ausencia de previsión de medidas de evitación del daño en los planes y programas de medidas de los correspondientes planes, que daría lugar a la imputabilidad del daño a la Administración competente para su elaboración, con concurrencia de responsabilidades en caso de elaboración conjunta o en los casos en que hemos visto que se requieren informes de Administraciones.

En segundo lugar, en la actividad de prevención del daño, bien por negligencia en la adopción de medidas de limitación o reducción del riesgo a las que la Administración esté obligada en virtud de sus deberes de policía demanial (artículos 23, 40, 42, 92 y 94 TRLA, que obligan a los organismos de cuenca a realizar las correspondientes actuaciones tendentes al mantenimiento y conservación de los cauces y a asegurar su protección conforme a lo previsto en el Plan Hidrológico de Cuenca)[35], bien cuando el daño se produzca por negligencia en el ejercicio de las potestades de control sobre las actividades expuestas en el domino público (en este caso la omisión sería imputable a la Administración hidráulica: organismos de cuenca), o cuando se produzca por negligencia en el ejercicio de las potestades de control sobre las actividades expuestas en zonas de riesgo de inundación que no tengan la consideración de dominio público hidráulico (casos de autorización de actividades en zonas de riesgo de inundación[36]). En todos los casos, adquiere también especial importancia la exactitud y precisión de los mapas de peligros y riesgos de inundación existentes, que delimitarán exactamente el alcance del incumplimiento administrativo.

Una vez determinada la imputabilidad de la Administración actuante (o no actuante cuando debió hacerlo), se valoraría la concurrencia del resto de requisitos normativos para la procedencia o no de la indemnización. Especialmente, en cuanto a la prueba del nexo o relación de causalidad. Esta relación causal podría quedar acreditada, conforme a la mayoría de las teorías jurisprudenciales de la causalidad, en los siguientes supuestos: en los casos de acción, cuando el daño se debe a la generación de zonas inundables nuevas por obras de infraestructura: si no se hubieran realizado dichas obras, la zona no sería inundable y no se habrían producido los daños; y en los casos de inactividad o falta de actuación: cuando, de no haberse autorizado los usos urbanísticos vulnerables en la zona con riesgo de inundación conocido, no se hubiera producido el daño, y cuando, de haber ejercido sus potestades de disciplina o control, se hubiera evitado el daño.

4.2. La necesidad de revisión del planeamiento urbanístico en relación con la prevención de riesgos de inundación con motivo del cambio climático

Hemos conocido, por lo tanto, cómo los planes urbanísticos han de delimitar las zonas inundables con base en los instrumentos técnicos normativamente previstos para cartografiar los peligros y riesgos de inundación, y la vinculación de estos planes urbanísticos a los Planes de Gestión de Riesgos

[35] Por ejemplo, véase la STS 31-10-2006, rec. 3952/2002. Puede encontrarse una selección de sentencias sobre diferentes situaciones y casos en Conde Antequera (2015:85).
[36] Es el caso, por ejemplo, de SAN 21-12-2005 (rec. 1976/2001), que reconoció responsabilidades administrativas por los daños originados por el aluvión de Biescas.

de Inundación, a lo dispuesto al respecto en los Planes Hidrológicos de Cuenca y a los planes especiales de protección civil. Y, si bien hemos comprobado que el protagonismo en la evaluación de los riesgos de inundación y de su cartografía lo asumen pues las Administraciones hidráulicas, no es menos cierto que, en definitiva, son los planes de ordenación urbanística los que delimitan en cada ámbito territorial que va a ser objeto de transformación urbanística las zonas que han de quedar sujetas a un régimen específico de protección en atención a esos riesgos naturales de inundación. De este modo, cualquier plan general de ordenación urbana que se haya elaborado o aprobado a partir de la vigencia de esta normativa tendrá en cuenta estos criterios y habrá establecido las medidas oportunas al respecto.

Las cuestiones que planteamos ahora son, por un lado, si los planes que ya están aprobados sin haber incluido en su evaluación esos mapas de riesgos de inundación han de actualizarse y ser revisados para adaptarse a estas previsiones y realizar un adecuado tratamiento urbanístico de las zonas inundables; y, por otro, si la constatación de las variaciones en cuanto a intensidades y frecuencias de las inundaciones que se ha determinado como uno de los efectos del cambio climático, y que pone en tela de juicio la validez o eficacia de los actuales mapas de riesgos de inundación que se hubiesen redactado conforme a unos criterios técnicos (periodos de retorno y datos de series históricas) que pueden verse ahora superados por esas variaciones, obligaría a una nueva revisión de esos planes urbanísticos conforme al principio de prevención.

La razón es evidente y consecuente: si no se revisan estos planes conforme a estos nuevos criterios de evaluación del riesgo de inundación y se producen daños por avenidas o inundaciones que, de haberse previsto en los planes conforme a las nuevas previsiones técnicas, ¿podría deducirse una responsabilidad para las Administraciones municipales por tales daños con fundamento en una falta de diligencia en la realización de dicha adaptación ante unos efectos previsibles del cambio climático?

En este sentido, y sin perjuicio de que la normativa urbanística actual puede resultar suficiente para amparar las oportunas modificaciones de los PGOU al respecto, hemos de referirnos ahora también a lo dispuesto en el artículo 19 del Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética, que se refiere a la necesidad de tomar en consideración el cambio climático en la planificación y gestión territorial y urbanística y en las intervenciones en el medio urbano, en la edificación y en las infraestructuras del transporte, incluyendo entre los objetivos de esta planificación también la consideración de los riesgos derivados del cambio climático en coherencia con las demás políticas relacionadas. Lo más interesante de este proyecto, acorde ya a los objetivos de la Agenda 20-30, es que se refiere a la necesidad de integración en los planes de ordenación territorial y urbanística de las medidas necesarias para la adaptación progresiva y resiliencia frente al cambio climático y también, incluye un objetivo novedoso: la adecuación de las nuevas instrucciones de cálculo y diseño de la edificación y las infraestructuras de transporte a los efectos derivados del cambio climático así como la adaptación progresiva de las ya aprobadas. Sin embargo, aunque estas previsiones parecían anunciar una decisión implicada en la materia, la Disposición Transitoria 2ª de este proyecto de Ley dice que esas previsiones de consideración de los riesgos del cambio climático en los planes y de integración en estos de las medidas necesarias para la adaptación progresiva y resiliencia frente al cambio climático "*no serán de aplicación al caso de planes, programas y estudios cuya tramitación ya se hubiese completado en el momento de entrada en vigor de esta Ley*".

Por lo tanto, esta Disposición Transitoria frustra la expectativa de que una norma de tal calado, como será esta Ley, aclare la situación y declare con contundencia esa obligación administrativa de permanente adaptación de los PGOU a la realidad del cambio climático y su papel para la garantía de la seguridad de las personas. Sólo cuando estos planes vayan a ser modificados se exigiría, por lo tanto, la integración de estos criterios de evaluación del riesgo de inundaciones en los mismos.

Por otro lado, la creación, con la referida Ley de Cambio Climático, de un Comité de Expertos de Cambio Climático y Transición Energética, como órgano "responsable", según dicho proyecto de Ley, de evaluar y hacer recomendaciones sobre las políticas y materias de energía y cambio climático, incluidas las normativas, podría tener repercusión también en la teoría de la responsabilidad patrimonial de la Administración a la hora de valorar cuál es la Administración obligada a indemnizar en los casos en los que la deficiencia en las medidas programadas para evitar los riesgos o los errores en la evaluación de los mismos pueda considerarse causa de los daños producidos.

4.3. El daño por inundaciones sobre bienes ya expuestos en zonas de riesgo

Finalmente, otra de las cuestiones de mayor calado social que plantea el reconocimiento de responsabilidad patrimonial en supuestos de daños ocasionados por inundaciones es la de los casos de daños sobre edificaciones o construcciones ubicadas en zonas de riesgo de inundación ya admitidas y consolidadas conforme a un planeamiento urbanístico previamente aprobado. Es decir, esas edificaciones que se construyeron en zonas inundables o con riesgo de inundación, autorizadas y permitidas conforme a un planeamiento urbanístico que, o bien desconocía el riesgo, o no tuvo en cuenta los principios de precaución y desarrollo urbanístico sostenible que actualmente inspiran la legislación y la elaboración de los planes urbanísticos, que hemos expuesto anteriormente. En otros casos, la necesidad de aumentar la precaución con motivo de los efectos del cambio climático supone que la delimitación de esas zonas inundables haya podido sufrir variaciones en cuanto a su ubicación o extensión desde que fueron inicialmente planificadas.

En estos casos, conocido hoy el riesgo, se plantea la difícil decisión de si ha de revisarse el planeamiento que permitió estas edificaciones y adoptar medidas para desocupar las zonas inundables, valorando la posibilidad de expropiar dichas edificaciones mediante el pago del correspondiente justiprecio, conforme a la legislación de expropiación forzosa, o indemnizar a los propietarios mediante acuerdos de desalojo de las zonas inundables, o bien mantenerlas y dilucidar, en su caso, las posibles responsabilidades administrativas por no evitar las consecuencias de un riesgo conocido por la Administración.

Ya el Decreto 2508/1975, de 18 de septiembre, sobre previsión de daños por avenidas preveía la desocupación de estas zonas inundables construidas mediante la expropiación forzosa de las edificaciones, al menos en los casos de excepcional urgencia y riesgo. Este Decreto preveía la demolición de construcciones y la retirada de instalaciones, plantaciones o cualquier obstáculo que perturbase el régimen de las corrientes y la restauración del Dominio Público Hidráulico. También el artículo 28.3 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, consciente de este problema, ordenaba al Ministerio de Medio ambiente promover convenios de colaboración con las Administraciones autonómicas y locales para eliminar las construcciones e instalaciones ubicadas en dominio público hidráulico y también en zonas inundables con riesgo grave para las personas y los bienes. Y, en el apartado 4, se refería a la obligación de las administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo para llevar a cabo las actuaciones en cauces públicos situados en zonas urbanas, sin perjuicio de las competencias de la Administración hidráulica sobre el dominio público hidráulico, posibilitando la suscripción de convenios entre estas Administraciones y el Ministerio de Medio ambiente para la financiación de estas actuaciones.

También el Real Decreto 903/2010, al referirse a las medidas que han de incluir obligatoriamente los Planes de Gestión de Riesgo de Inundación, se refiere a la obligación de adoptar todas aquéllas medidas necesarias para alcanzar el objetivo de reducir las consecuencias potenciales adversas de la inundación para la salud humana y las infraestructuras, incluyendo entre las mismas, en el apartado 5 de la parte A del anexo ("Contenido de los planes de gestión del riesgo de inundación), las previsión de medidas para adaptar el planeamiento urbanístico vigente a los criterios establecidos en el plan de gestión del riesgo de inundación, incluida la posibilidad (no se refiere a obligatoriedad) de retirar

construcciones o instalaciones existentes que supongan un grave riesgo (hemos de entender, en zonas delimitadas como de grave riesgo o cuando técnicamente quede justificada dicha gravedad). A los efectos de la expropiación forzosa de estas construcciones, que es la medida jurídica a la que acude este Reglamento para ello, dispone la declaración de utilidad pública de dicha expropiación[37].

Sin embargo, no nos consta, como es evidente si observamos la realidad actual tristemente manifestada a veces en las noticias de los diarios o telediarios, una rigurosa aplicación de estas previsiones anteriores. Es decir, esta normativa no ha sido materializada en la práctica, seguramente, por razones económicas, teniendo en cuenta cuál podría ser el montante de esos justiprecios o, en su caso, de las correspondientes indemnizaciones.

¿Qué soluciones jurídicas podrían existir al respecto, teniendo en cuenta esta situación? Una opción podría ser entender que, en los casos en que se produzcan daños sobre estas edificaciones, cabría exigir responsabilidad patrimonial a la Administración, sobre todo, si tenemos en cuenta la posible aplicación retroactiva de los mapas de peligros y de riesgos de inundación y la necesidad de revisión de los planes de ordenación urbanística que conllevaría[38]. La modificación de los PGOU para prever estas situaciones supondría así bien la necesidad de expropiación de dichas edificaciones (solución propuesta por el Decreto de 175), bien su mantenimiento, en los casos que se considerasen, deviniendo entonces dichas edificaciones en situación de "fuera de ordenación" y, siéndoles de aplicación, por lo tanto, el régimen previsto para esta situación, bien la realización de medidas estructurales para la protección de las construcciones o actividades expuestas.

Alguna de éstas parece ser la solución propuesta por la Guía metodológica "Medidas para la mitigación y la adaptación al cambio climático en el planeamiento urbano"[39] para los casos en que los efectos del cambio climático se hayan traducido en una extensión de las áreas de riesgo. Esta Guía, en el área temática 2 ("pautas de ocupación del suelo"), establece como medida específica respecto a las áreas ya construidas en zonas en las que el cambio climático puede suponer un aumento de los riesgos de inundación, "*dejar fuera de ordenación aquellas áreas ya construidas en las que el aumento de los riesgos* (sobre todo de inundación) *lo haga aconsejable, con objeto de que en un tiempo prudencial puedan abandonar su condición de áreas urbanas*" (apartado 12).

En cualquier caso, es claro que un mayor conocimiento técnico conlleva una ampliación de la responsabilidad, y que responsabilizar a las Administraciones de los daños ocasionados por inundaciones que éstas podrían haber evitado, siempre con parámetros de proporcionalidad, puede traducirse en un acicate para que éstas extremen la diligencia que, en muchos casos, le es debida.

REFERENCIAS

- Conde Antequera, J. (2015). La responsabilidad de la Administración por daños derivados de fenómenos naturales: especial referencia al riesgo de inundación. *Revista Aragonesa de Administración Pública,* 45, 67-100.
- Escartín Escudé, V. (2009). *El periurbanismo estatal: la ordenación urbanística del dominio*

[37] Para Escartín (2016:251), esto constituye un ejemplo de lo que él denomina "periurbanismo estatal" (2009), manifestando cómo el Estado, a través de un título competencial sectorial, incide en la ordenación urbanística y territorial.
[38] Al respecto, González García (2009:93) considera la teoría del carácter retroactivo de los mapas de riesgos a efectos de la responsabilidad de la Administración. La detección posterior de un peligro natural supondría la necesidad de revisión del planeamiento para adaptarlo a estos nuevos mapas y para garantizar la seguridad de las personas. También Esteve Pardo (2009:4) fundamenta en el principio de prevención la responsabilidad administrativa por no prever un riesgo natural existiendo ciencia adecuada para ello.
[39] Elaborada por la Red Española de Ciudades por el Clima y la Federación Española de Municipios y Provincias, con la colaboración del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

público del Estado. Marcial Pons/ADESTER, Madrid

- Escartín Escudé, V. (2016). Incidencia en el modelo de ocupación del territorio de la gestión de los riesgos de inundación. *Revista Aragonesa de Administración Pública,* XVI, 233-279.
- Esteve Pardo, J. (1999). *Técnica, riesgo y Derecho. Tratamiento del riesgo tecnológico en el Derecho Ambiental.* Ariel, Barcelona.
- Fernández García, J. F. (2010), "La responsabilidad patrimonial de la Administración hidráulica en el supuesto de inundaciones". *Revista de Administración Pública*, 182, 123-158.
- González García, J. L. (2009). *Mapas de riesgos naturales en la ordenación territorial y urbanística*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid.
- González-Varas Ibáñez, S. (2005). Los riesgos naturales y la ordenación territorial y urbanística. En: *Agua y Urbanismo,* 119-142. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Jordano Fraga, J. (2000). *La reparación de los daños catastróficos. Catástrofes naturales, Administración y Derecho Público: responsabilidad, seguro y solidaridad*. Marcial Pons, Madrid.
- Jordano Fraga, J. (2003). Ciencia, tecnología, medio ambiente y responsabilidad patrimonial de la Administración: en especial, los denominados riesgos del desarrollo. *Documentación Administrativa*, 265, 1-29.
- Menéndez Rexach, Á. (2006). Protección de la calidad de las aguas y actuaciones hidráulicas en el medio urbano. En: *Medio ambiente urbano,* 161-188. Consejo General del Poder Judicial, Madrid.
- Menéndez Rexach, Á. (2015). Delimitación de zonas inundables y planes de gestión del riesgo de inundación. *Revista Ambienta,* 110, 36-43. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_AM/PDF_AM_Ambienta_2015_110_36_45.pdf
- Molina Giménez, A. (2010). La disciplina territorial del riesgo de inundaciones en el ordenamiento jurídico español. *Revista Aranzadi de Derecho Ambiental,* 18, 39-72.
- Ochoa Monzó, J. (1998). *Riesgos mayores y protección civil*. McGraw Hill, Madrid.
- Ochoa Monzó, J. (2005). Planificación territorial, protección civil, prevención de riesgos de inundaciones. En: *Agua y urbanismo,* 253-280. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Olcina Cantos, J. (2007). *Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en España*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Sánchez Morón, M. (1990). Planificación hidrológica y ordenación del territorio. *Revista de Administración Pública,* 123, 35-60.

EVALUACIÓN DE IMPACTO SOCIAL COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE POR INUNDACIÓN

Antonio Aledo
Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales y Departamento de Sociología I, Universidad de Alicante, España
antonio.aledo@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-9261-1292

Pablo Aznar-Crespo
Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante, España
pablo.aznar@ua.es
https://orcid.org/0000-0001-9095-9044

Guadalupe Ortiz
Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales y Departamento de Sociología I, Universidad de Alicante, España
guadalupe.ortiz@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-5334-1322

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar una propuesta de integración conceptual y metodológica de la Evaluación de Impacto Social (EIS) al ámbito del análisis y la gestión del riesgo de desastre por inundación, a fin de analizar de forma sistemática los impactos de las inundaciones e identificar medidas de gestión para reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de adaptación de los grupos sociales en riesgo. Esta integración, realizada a partir de un formato de EIS con vocación de gestión proactiva de los impactos, persigue un análisis del riesgo de desastre por inundación y sus impactos que permita abordar: a) la elevada complejidad casuística y generativa de los desastres en el marco de los sistemas socio-ecológicos; b) la desigual distribución social de los impactos; y c) la gestión de la incertidumbre a partir de la propuesta de medidas de gestión para la reducción de las pérdidas humanas, sociales y económicas.

1. INTRODUCCIÓN

En la era del Antropoceno, las actividades humanas constituyen los principales motores que dinamizan las fuerzas generativas de los desastres. El caso más evidente es la alteración climática generada como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero, la cual está provocando un aumento de los fenómenos climáticos extremos. En la cuenca norte del Mediterráneo, la subida de temperaturas desde 1880 es un 20% mayor (1,5 °C) que en el resto del planeta, con un descenso global de los niveles de precipitación y un incremento de los episodios de alta intensidad (Camarero y Olcina, 2020). Entre 1995 y 2001, los desastres por inundación produjeron costes económicos por valor de 2,3 billones de dólares y provocaron el fallecimiento de alrededor de 157.000 personas en todo el mundo (CRED, 2010). Los estudios sobre cambio climático pronostican un aumento de la intensidad y frecuencia de este tipo de desastres para los próximos años, por lo que es más que

probable un incremento de las pérdidas económicas y un aumento del número de víctimas humanas, también en regiones desarrolladas.

Ante este escenario, las instituciones globales para la gestión de desastres recomiendan desarrollar estrategias de preparación que incorporen la combinación de medidas estructurales y no estructurales (Kelman, 2015). Los expertos insisten en la importancia de diseñar planes de gestión que no sean exclusivamente reactivos y emergencionistas (Wahlström, 2015). Por el contrario, se apuesta por medidas que recorran todas las fases del ciclo del desastre y hagan especial incidencia en las propuestas de reducción de la vulnerabilidad y el fortalecimiento de la respuesta adaptativa de las poblaciones locales y el ecosistema (Aitsi-Selmi et al, 2015).

Este nuevo enfoque institucional de gestión de desastres hunde buena parte de sus raíces en el trabajo seminal de Blaikie et al. (1994), en el que se presenta una nueva forma de interpretación de los riesgos ambientales al incluir en su ecuación los factores de vulnerabilidad social, exposición y capacidad de enfrentamiento. Este trabajo confirmó la doble naturaleza de los desastres, detonados por la amenaza natural pero socialmente cogenerados por medio de la influencia de procesos sociales de orden estructural (Wachinger et al., 2010).

El *Associated Programme on Flood Management* (APFM) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha identificado los principales impactos sociales generados por inundaciones. Este organismo ha agrupado los impactos en siete grandes categorías: 1) pérdida de vidas y propiedades; 2) pérdida de medios de subsistencia; 3) disminución del poder adquisitivo y de la producción económica; 4) migraciones masivas; 5) efectos psicosociales; 6) obstáculos al crecimiento económico y el desarrollo; y 7) consecuencias políticas. No obstante, más que a los impactos como tales, estas áreas de impacto se asemejan a lo que Vanclay (2002) denomina procesos de cambio social generados por las intervenciones planificadas. Desde una interpretación ontológicamente constructivista, el impacto se define como el modo en que las personas experimentan física o cognitivamente estos procesos de cambio (Vanclay, 2002, 6), en este caso generados por un episodio de inundación. De cualquier modo, estas categorías de fenómenos socioeconómicos ocasionados por las inundaciones sirven como punto de partida para la identificación apriorística de los impactos potencialmente ocasionados por inundaciones en delimitaciones espacio-temporales concretas.

A partir de la creciente relevancia que están adquiriendo los impactos sociales, se han formulado diferentes metodologías para integrarlos en el análisis y gestión de los desastres socioambientales (Cannon et al., 2003; Varda et al., 2009; Yasuhara, 2011). Varios autores han propuesto incorporar las metodologías de Evaluación de Impacto Social (en adelante, EIS) en el ámbito de la gestión de riesgo de desastre por inundación (en adelante, GRDI) por su capacidad para explicar y predecir la producción y comportamiento de riesgos e impactos (Brouwer y Van Ek, 2004; Allan, 2006; Usman et al., 2013).

Las EIS tienen como tarea central la identificación *ex-ante* de impactos sociales -entendidos como riesgos- ocasionados por una intervención en el medio o proyecto de desarrollo. Una vez identificados los impactos, la EIS tiene por objetivo ofrecer un conjunto de medidas, obtenidas mediante procesos participativos, para: 1) anticipar los impactos e intervenir su proceso generativo para minimizar los costes sociales; y 2) reducir la vulnerabilidad de las poblaciones potencialmente afectadas, reforzando su capacidad de confrontación (Craig, 1990). Con estos propósitos, las primeras fases de la EIS desarrollan un estudio de base en el que se analiza el entorno físico y sociopolítico donde se implementa la intervención en el medio. También se incluye el estudio detallado del proyecto, su morfología y características técnicas, así como un análisis de sus fórmulas de gobernanza y gestión. Por último, esta primera fase estudia la comunidad afectada, desagregada por niveles de vulnerabilidad local y supralocal. Seguidamente, se realiza un análisis de *stakeholders* a fin de

identificar la red de grupos de interés, afectados y responsables que puede emanar del proyecto. En las fases centrales de la EIS, se detectan y evalúan los impactos sociales y se proyecta su distribución social entre los diferentes grupos de afectados, con especial atención a los grupos más vulnerables. A partir de tal evaluación, en la etapa final se diseñan propuestas para modificar el proyecto, disminuir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de confrontación de los afectados. El fin último de esta fase es maximizar los efectos positivos y eliminar, minimizar o compensar aquellos de naturaleza negativa (Aledo y Domínguez-Gómez, 2019). De esta forma, el trabajo evaluativo aborda en su totalidad el proceso generativo de los impactos, que parte de un foco, actividad o evento estresante que produce alteraciones en el medio socioambiental que a su vez son moduladas por el entorno socio-institucional y las capacidades de adaptación de los individuos hasta su conversión en formas específicas de afectación o impactos (Serje, 2017).

De acuerdo con esta conceptualización de los procesos generativos de impacto, este trabajo propone adaptar las metodologías EIS, normalmente orientadas a la evaluación de proyectos (construcción de represa, proyectos mineros, proyectos de infraestructura, etc.), al caso de los desastres socioambientales (riesgo de inundación), aplicando así la EIS como una herramienta predictiva y propositiva para la gestión de los impactos sociales provocados en episodios de inundación. De esta forma, el objetivo de este trabajo es asentar de forma exploratoria las bases conceptuales y metodológicas de la adaptación de la EIS al ámbito de la GRDI.

2. PRINCIPIOS CONCEPTUALES

La inclusión de las EIS en la GRDI tiene como objetivo fortalecer el proceso de toma de decisiones relacionado con la gobernanza de sus impactos sociales. La interpretación contemporánea de las metodologías EIS, con una base constructivista y participativa orientada a la gestión de proyectos (Esteves et al., 2012), no limita sus productos a la mera medición de los impactos positivos y negativos. La interpretación clásica de la EIS, por el contrario, define los impactos sociales como realidades uniformes y objetivas, está basada en el criterio de los expertos, propone la medición de los impactos directos y suele estar dirigida a la aprobación *ad hoc* de los proyectos. Sin embargo, la evolución de la herramienta EIS se ha dirigido hacia fórmulas más proactivas de reducción de los impactos negativos y maximización de los impactos positivos a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Weidema, 2006). Para satisfacer tal propósito, resulta necesario incluir en el proceso de evaluación el análisis causal de los impactos y de los procesos sociohistóricos que moldean estos procesos generativos, desde su origen hasta su expresión local en forma de impactos directamente experimentados por las comunidades afectadas. Por tanto, el objetivo final de este modelo no es tanto la identificación y medición de los impactos como la comprensión holística y profunda de los mismos, a partir de la cual se posibilita una identificación estratégica de las alternativas de gestión.

Para comprender esta propuesta de aplicación innovadora de la EIS a la GRDI, se hace necesario establecer unos principios conceptuales que enmarquen, expliquen y dirijan los pasos metodológicos que posteriormente serán descritos. Este esfuerzo pedagógico por explicar el empleo de la metodología EIS en la GRDI obliga a revisar los elementos paradigmáticos que la sostienen. En última instancia, ha de entenderse que esta propuesta no constituye simplemente una herramienta a disposición de los expertos, sino que representa una forma de mirar y aproximarse científicamente a la compleja realidad de la producción y gestión de los impactos sociales desde posicionamientos teórico-conceptuales sólidos que permitan afianzar las decisiones metodológicas del proceso de investigación. El reconocimiento de la complejidad de los desastres en su doble naturaleza social y ambiental, la introducción del paradigma de la vulnerabilidad social, la discusión axiológica, ontológica y epistemológica que soportan las decisiones metodológicas o el reconocimiento de la incertidumbre como entorno implícito de los desastres, constituyen elementos a tener en cuenta para realizar una adaptación consistente de la EIS a la GRDI.

En primer lugar, la morfología del desastre, su intensidad y la distribución de sus efectos están condicionadas por multitud de variables ambientales, económicas, sociales, políticas y culturales (Ribot, 2014). Así, la ordenación del territorio juega un papel fundamental en la amplitud espacial del desastre (Ayala-Carcedo, 2000). Por su parte, la exposición de infraestructuras, viviendas y personas no es solo una variable espacial, sino que está también relacionada con la producción sociopolítica del espacio, así como con la capacidad de las élites de direccionar las morfologías territoriales en su beneficio y socializar los efectos negativos que tales modelos generan (Hartman y Squires 2006). En este sentido, se debe entender que los impactos son el producto de la compleja interacción de una amenaza natural en un territorio sociohistóricamente conformado. Los impactos interactúan en macroentornos institucionales que modulan su configuración hasta alcanzar la forma específica en que los actores sociales los experimentan desde posiciones estructurales determinadas.

Esta complejidad obliga la incorporación de diseños de investigación posnormales (Funtowicz y Ravetz, 2000). Estos nuevos diseños se caracterizan por: 1) la construcción de equipos multidisciplinares capaces de descifrar tal complejidad; 2) la ampliación de la comunidad de evaluadores, incluyendo una nueva definición de expertos que incorpore saberes locales altamente contextualizados (Marshall y Picou, 2008); 3) la redefinición de la estrategia de identificación de impactos en situaciones de desastre para reconocer la historia de su producción social (Aznar-Crespo et al., 2020); y 4) la condición estructural de la incertidumbre ante la imposibilidad científica de identificar la totalidad de las cadenas de impactos generados en los complejos entornos que constituyen y configuran los desastres.

La nueva dirección de la ciencia de los desastres comporta un giro paradigmático en esta disciplina (Aledo y Domínguez-Gómez, 2017). No son solo nuevas herramientas y conceptos los que se emplean, sino que su incorporación comporta modificaciones centrales en las estructuras axiológicas, ontológicas y epistemológicas del modo de investigar. Atendiendo a este nuevo paradigma, las cuestiones axiológicas previas a cualquier investigación deben: 1) reconocer al medio ambiente como sujeto moral; 2) atender prioritariamente a los grupos vulnerables; y, especialmente, 3) sopesar si el objetivo de la recuperación post-desastre se dirige a reconstruir el *statu quo* o, por el contrario, a sustentar una discusión deliberativa sobre nuevas opciones de desarrollo.

Por lo que respecta a la reflexión ontológica que conduce el nuevo paradigma de gestión del riesgo, es conveniente señalar que los conceptos de desastre e impacto experimentan una profunda transformación en los contenidos de sus definiciones. Ambos dejan de ser hechos objetivos, identificables por los expertos a través de sus herramientas científicas de detección y medición, para convertirse en objetos de disputa nominalista. Tanto el impacto como el desastre son experiencias físicas y cognitivas de los afectados y, al mismo tiempo, objetos políticos de debate en lo que se refiere a su contenido y valoración. En otras palabras, los desastres e impactos, además de poseer un formato de representación física, son constructos sociales y políticos (Craig, 1990; Guggenheim, 2014) sujetos a la divergencia de significados de los actores sociales que los experimentan (Stirling, 2003).

Estas cuestiones axiológicas y ontológicas modifican radicalmente la forma en que los investigadores se aproximan al objeto y los sujetos de estudio. La fórmula epistemológica positivista y tecnocrática se ve sustituida por propuestas científicas en las que se amplía la comunidad de evaluadores y se reconoce la influencia de los contextos políticos y culturales sobre el proceso de investigación (Walker, 2010). Esta epistemología conduce hacia procesos participativos y deliberativos encaminados, no tanto a producir certezas, sino a encontrar las mejores soluciones para los problemas (Dryzek, 1990). Estas soluciones están sujetas al escrutinio social y están altamente contextualizadas en espacios y tiempos concretos.

Con la finalidad de sintetizar la adaptación conceptual de la EIS al ámbito de la GRDI, resulta conveniente analizar los paralelismos entre: a) los dos tipos básicos de EIS: interpretación clásica o EIS *statement* e interpretación contemporánea o *management* (Esteves et al., 2012); y b) los dos principales enfoques de gestión tradicionalmente identificados en el ámbito de la GRDI: el paradigma hidráulico y el enfoque de la vulnerabilidad social (Wilhite, 2005). Por un lado, es posible establecer analogías paradigmáticas entre la EIS clásica o *statement* y el paradigma hidráulico (Tabla 1). Ambos modelos participan de una visión homogénea y reduccionista de los impactos, restringen el ejercicio de evaluación al método científico y optan por soluciones estructurales bajo los principios del optimismo tecnológico y la incuestionabilidad del riesgo (Aledo y Sulaiman, 2014). En esencia, ambos planteamientos responden a los principios onto-epistemológicos propios del enfoque tecnocrático-positivista.

Criterio	**EIS-clásica (proyecto)**	**Paradigma hidráulico (desastre por inundación)**
Realidad	Objetiva y uniforme (desarrollismo económico)	Causalidad natural (desastre natural inevitable)
Tipología	Impactos sociales y económicos	Daños materiales, víctimas y actividad económica
Evaluación	Científicos (equipo de investigación de la EIS)	Técnicos, ingenieros y autoridades institucionales
Temporalidad	Impactos directos a corto plazo (desarrollo)	Impactos a corto plazo (durante y después inmediato)
Función	Aprobación *ad hoc* del proyecto	Recuperación (emergencia) y vuelta a la normalidad
Medidas	Medidas estructurales y compensación de costes	Ingeniería hidráulica e indemnización por daños

Tabla 1. Similitudes paradigmáticas entre EIS-clásica y el paradigma hidráulico. Fuente: elaboración propia.

Criterio	**EIS-contemporánea (proyecto)**	**Enfoque vulnerabilidad social (desastre por inundación)**
Realidad	Desigual, dependiente de la posición socio-estructural	Socialmente construida (causas sociales del desastre)
Tipología	(+) Impactos sociales, políticos y culturales	(+) Impactos sobre condiciones de vida
Evaluación	(+) Procesos participativos con *stakeholders* afectados	(+) Procesos inclusivos de participación ciudadana
Temporalidad	Ciclo de vida del proyecto (diseño, desarrollo y cierre)	Ciclo del desastre (antes, durante y después)
Función	Gestión proactiva de los impactos del proyecto	Reestructuración e inicio de "nueva normalidad"
Medidas	(+) Rediseño de proyecto con atención a vulnerables	Medidas no estructurales (SBN* y capacidad adaptativa)

Tabla 2. Similitudes paradigmáticas entre EIS-contemporánea y el enfoque de la vulnerabilidad social. (*) Soluciones Basadas en la Naturaleza. Fuente: elaboración propia.

3. ADAPTACIÓN METODOLÓGICA

Una vez establecidos los principios conceptuales que rigen las opciones metodológicas para la adaptación de la EIS al ámbito de la GRDI, se procede a una breve descripción de las características de sus cuatro fases principales (Fig. 1): 1) estudio de base; 2) análisis de stakeholders; 3) análisis de impactos, y 4) análisis de alternativas.

Por otro lado, y en contraposición con el anterior modelo, es posible establecer un paralelismo entre la EIS contemporánea con vocación de management y el enfoque de la vulnerabilidad social aplicado a la GRDI (Tabla 2). Ambos planteamientos reconocen el carácter socialmente construido de los impactos, proponen la participación social como instrumento para reconocer e incorporar la heterogeneidad social en los procesos de evaluación-decisión y reivindican la importancia de las medidas no estructurales basadas en la capacitación social de las unidades de exposición y la funcionalidad de los servicios ecosistémicos.

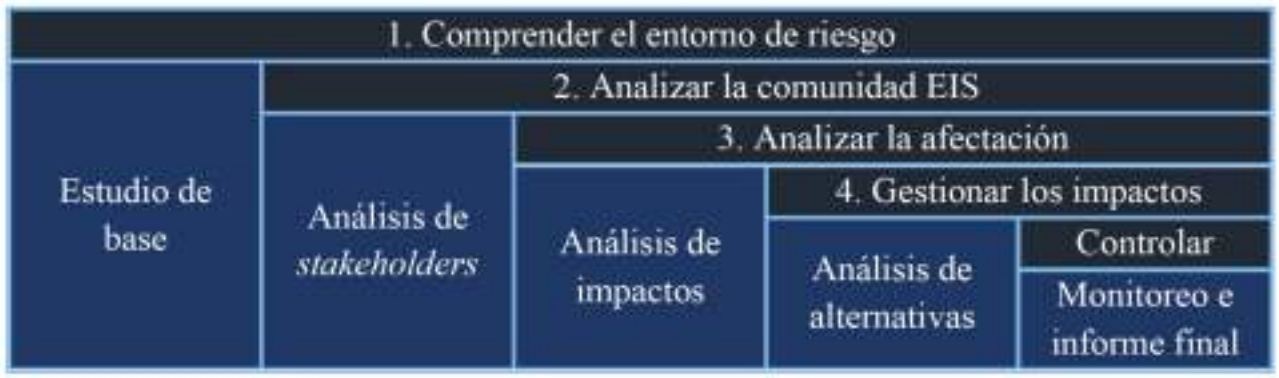


Figura 1. Principales fases de la EIS aplicada a la GRDI. Fuente: elaboración propia.

3.1. Estudio de base (fase 1)

El estudio de base está dirigido a analizar de forma pormenorizada los tres componentes básicos del proceso generativo de los impactos: a) las características de la amenaza natural; b) las capacidades adaptativas de las unidades de exposición; y c) el contexto social de intermediación. El objetivo del estudio de base es establecer un marco de referencia analítico sobre el entorno de riesgo objeto de estudio que garantice el ajuste contextual del resto de fases de la EIS. El estudio de base se compone por tres etapas: a) revisión de casos-espejo; b) análisis de la amenaza natural; y c) análisis del contexto social y de las unidades de exposición.

3.1.1. Revisión de casos-espejo

La revisión de casos-espejo consiste en realizar una búsqueda a través de fuentes científicas y literatura gris de eventos de desastre por inundación producidos en el pasado en el área de influencia de la región caso de estudio. La función de los casos-espejo es estimar a partir de experiencias pasadas el riesgo de desastre por inundación que experimenta una sociedad y territorio concretos, así como identificar los impactos, unidades de exposición y medidas de gestión más frecuentes. No obstante, las conclusiones inferidas a partir del análisis de casos-espejo han de tener siempre un carácter parcial y aproximado. La influencia del cambio climático sobre el régimen pluviométrico ha incrementado en algunas regiones los niveles de peligrosidad de las amenazas climático-meteorológicas, aumentando así los niveles de incertidumbre de los análisis comparativos. Los tres *outputs* más importantes de una revisión de casos-espejo son:

a) *Pre-listado de impactos-tipo*: conjunto de impactos más comúnmente ocasionados entre los episodios de desastre analizados.

b) *Pre-listado de unidades de exposición-tipo*: unidades territoriales y grupos sociales de pertenencia más frecuentemente afectados por eventos desastrosos.
c) *Pre-listado de medidas-tipo*: conjunto de medidas y acciones generalmente aplicadas en los procesos de GRDI en su conjunto.

3.1.2. Análisis de la amenaza natural

La amenaza natural constituye la fuerza o estímulo estresante del que emergen los focos de afectación. La combinación de la magnitud de la amenaza y la capacidad adaptativa de las unidades de exposición configura la intensidad de los impactos y determina la posibilidad de ocurrencia de un desastre. El análisis de la amenaza consiste en llevar a cabo una descripción detallada de sus características y niveles de peligrosidad en el ámbito espaciotemporal de la región objeto de estudio. Así, esta fase de la EIS adaptada a la GRDI consta de dos apartados o etapas: a) análisis de la peligrosidad de la amenaza; y b) análisis del área-tiempo de afectación.

En primer lugar, para llevar a cabo el análisis de la peligrosidad de la amenaza es conveniente consultar las fuentes de información disponibles sobre series de precipitación y cartografías de inundabilidad. No obstante, cuando la información para una zona específica sea insuficiente, esté desactualizada o la delimitación del área de estudio sea muy específica y requiera del manejo de escalas de mayor detalle, el equipo a cargo de la EIS puede optar por la elaboración de estudios de inundabilidad. Por esta razón, y dado que la GRDI constituye un fenómeno complejo y multidimensional, es conveniente que los equipos de trabajo sean multidisciplinares e incorporen la mayor pluralidad posible de conocimientos conceptuales y técnicos. A partir del análisis de peligrosidad es necesario recopilar información específica sobre:

a) *Régimen pluviométrico*: análisis de series históricas sobre datos de precipitación en la zona de estudio. Asimismo, resulta conveniente estimar las alteraciones del régimen de precipitación en el marco del cambio climático. Los posibles cambios estructurales en el régimen pluviométrico pueden traer consigo una pérdida de longitudinalidad estadística. Esta alteración puede comportar un cuestionamiento de las referencias temporales a partir de las cuales se estima la periodicidad de las lluvias torrenciales y se diseñan medidas estructurales de protección. El manejo de los periodos de retorno (T) debe realizarse de forma prudente, y siempre reconociendo un significativo nivel de incertidumbre.
b) *Inundabilidad*: análisis de las características del territorio fluvial y estimación de los niveles de inundabilidad (calado y escorrentía superficial). En este sentido, es conveniente analizar la influencia de los procesos antropogénicos sobre la amplificación de los niveles de peligrosidad, especialmente los relativos a los cambios de uso de suelo. Como resultado principal, se deben delimitar y caracterizar las zonas inundables del área de estudio.

En segundo lugar, ha de realizarse un estudio del *área-tiempo de afectación*. Por un lado, han de delimitarse las tres principales fases del *ciclo de vida de la amenaza*, es decir, los estadios temporales en los que la inundación por lluvia torrencial exhibe diferentes formas de comportamiento e influencia. La delimitación de las etapas de la amenaza desde su previsión hasta su disipación permite la identificación estratégica de necesidades y opciones específicas de respuesta:

a) *Pre-evento*: tiempo que transcurre entre la predicción de la amenaza y el inicio de la precipitación. La predictibilidad de las lluvias torrenciales, entre otras cosas, determina la puesta en funcionamiento de sistemas de alerta temprana.
b) *Evento*: momento durante el cual se produce la descarga de precipitación, se produce la escorrentía superficial y tiene lugar la progresión del nivel de calado. La distribución espacial y temporal de la precipitación, en combinación con su magnitud, constituye uno de los principales factores de peligrosidad de esta amenaza.
c) *Post-evento*: fase que transcurre entre el cese de la precipitación y el avenamiento de las áreas anegadas. Pese al cese de la lluvia en un determinado punto geográfico, pueden permanecer

activos focos de afectación relacionados con el caudal de los ríos y el correspondiente riesgo de desbordamiento o la acumulación y depósito de agua en superficie.

Por otro lado, ha de llevarse a cabo una demarcación de los principales espacios de afectación, esto es, de las unidades territoriales primarias y secundarias definidas como tales en función de la distribución espacial de los niveles de precipitación e inundabilidad. Fundamentalmente, pueden diferenciarse dos niveles espaciales de afectación:

a) *Espacio primario*: enclave donde tienen lugar los mayores niveles de inundación o *zona cero* del evento. El nivel de inundabilidad de un área geográfica suele estar determinado por los niveles de precipitación registrados en su delimitación más inmediata, especialmente en el caso de las inundaciones relámpago o *flash-floods*. No obstante, las inundaciones producidas por el desbordamiento de ríos están también determinadas por los aportes recibidos del conjunto de la red hidrográfica de pertenencia. En cualquier caso, los espacios primarios son aquellos que experimentan los mayores niveles de inundabilidad durante un episodio. En este sentido, los espacios primarios suelen recibir los impactos de mayor intensidad, si bien el grado de afectación está también sujeto a los niveles de vulnerabilidad de las unidades de exposición.
b) *Espacio secundario*: compuesto por el resto de los puntos geográficos de la red hidrográfica donde tiene lugar el episodio de inundación. Se trata de los espacios: a) con influencia hidrográfica sobre los niveles de inundabilidad de un espacio primario; o b) indirectamente afectados por los efectos hidrológicos del evento, es decir, áreas donde los niveles de inundabilidad son menores. Los espacios secundarios suelen experimentar impactos de intensidad baja o moderada, salvo en aquellos casos en los que los niveles de vulnerabilidad son muy elevados.

3.1.3. Análisis del contexto social

El contexto se refiere al compendio de fuerzas estructurales y coyunturales de carácter social, económico y cultural que rigen el funcionamiento ideológico-normativo del sistema en su conjunto. El contexto social intermedia las relaciones de afectación entre la amenaza natural y las unidades de exposición como fuerza moduladora o de intermediación del proceso generativo de los impactos (Climent-Gil et al.,2018). El análisis del contexto consiste en la identificación de las fuerzas estructurales y elementos coyunturales que componen el marco contextual en dos niveles: supralocal y local. El nivel supralocal hace referencia al conjunto de macroestructuras que: a) rigen los modelos socioeconómicos sobre los que se asientan las condiciones de vida de las unidades de exposición; y b) influyen la orientación ideológica de los modelos de gestión. En el ámbito de la GRDI, han de analizarse las fuerzas supralocales presentes en los siguientes ámbitos:

a) *Cultura de riesgo*: sistema de valores, significados y comportamientos relacionados con la representación, conocimiento y respuesta ante el riesgo de inundación por parte de la población, los sectores económicos y las instituciones encargadas de la gestión.
b) *Cultura territorial*: sistema de valores, significados y comportamientos relacionados con la representación, conocimiento y gestión del territorio a nivel local y regional. En este sentido, resulta especialmente relevante analizar el modelo de ordenación territorial y su relación con la dinámica fluvial.
c) *Gobernanza de GRDI*: orientaciones y enfoques de gestión relacionados con la planificación hidrológica en materia de inundaciones. Presentan una importancia notable los contextos políticos e institucionales en los que se llevan a cabo los procesos de toma de decisiones para la planificación del riesgo.
d) *Marcos socioeconómicos*: en general, fuerzas sociales, culturales y económicas que rigen los sistemas de producción e intercambio socioeconómico sobre las que se asientan las capacidades adaptativas de las unidades de exposición.

Por otro lado, el nivel local se refiere a las condiciones infraestructurales que configuran de forma directa las capacidades de adaptación de las unidades de exposición para enfrentar el riesgo de desastre por inundación. Para llevar a cabo el análisis del contexto local puede hacerse uso del concepto de vulnerabilidad social, puesto que éste abarca el conjunto de condiciones sociales, económicas, políticas y culturales que determinan la capacidad de las personas, grupos y sistemas para hacer frente a las consecuencias negativas de fuerzas o eventos estresantes y recuperarse de los cambios que producen (Birkmann et al., 2013). Rufat et al. (2015) señalan las siguientes categorías analíticas de vulnerabilidad social ante riesgo de desastre por inundación:

a) *Características demográficas*: edad, raza, etnia, estructura familiar, género o conocimiento idiomático.
b) *Estatus socioeconómico*: ingresos-rentas, poder adquisitivo, estructura laboral, nivel educativo o capital social.
c) *Salud*: acceso a los servicios sanitarios públicos y privados y condiciones sociosanitarias de la población.
d) *Vivienda*: estructura de propiedad, regulación de asentamientos humanos, calidad habitacional, mercado de venta-alquiler o aseguración de viviendas y bienes.
e) *Características del barrio*: servicios urbanos básicos e infraestructuras de transporte.
f) *Percepción del riesgo*: conciencia y cultura del riesgo, experiencias previas de eventos de inundación, conocimiento de las medidas de autoprotección o confianza en las instituciones públicas por parte de la población local.

3.2. Análisis de *stakeholders* (fase 2)

En el ámbito de la EIS, el concepto de *stakeholder* hace referencia a todo individuo, grupo o institución que se ve afectado directa o indirectamente por los impactos de una actividad. El objetivo del análisis de *stakeholders* en el ámbito de la GRDI es identificar y caracterizar a los individuos y grupos –o representantes de estos– que componen su espacio de gobernanza y que presentan una relación de *responsabilidad*, *experimentación* o *interés* sobre el riesgo y su eclosión en forma de impactos. Estos tres formatos de afectación caracterizan a su vez a los tres tipos de *stakeholder* que deben ser identificados en una EIS aplicada a la GRDI:

a) *Tomadores de decisiones (responsabilidad)*: agentes y autoridades institucionales que asumen la responsabilidad de diseñar e implementar medidas y acciones dirigidas a la GRDI. Además de la relación de *responsabilidad*, de forma indirecta, los tomadores de decisiones pueden también *experimentar* algunos impactos indirectos en la fase post-desastre (ej. coste electoral por gestión ineficiente del desastre).
b) *Unidades de exposición (experimentación)*: personas, medios de vida, servicios y recursos ambientales, infraestructuras y bienes en situación de exposición que experimentan como tal los impactos del desastre. Además de la relación de *experimentación*, de forma secundaria las unidades humanas de exposición pueden ostentar una cierta *responsabilidad* para enfrentar individualmente el riesgo (ej. conocimiento y aplicación de medidas individuales de autoprotección).
c) *Terceras partes (interés)*: otros actores sociales, como organizaciones no gubernamentales o empresas del sector del agua, los cuales participan de la gobernanza de la GRDI y presentan un *interés* sobre el riesgo, bien por afectación económica (ej. efectos económicos de aplicación de medidas estructurales) o por motivación política (ej. acciones para un cambio de paradigma de gestión).

A fin de realizar una identificación y caracterización de los *stakeholders* que componen el entorno de gobernanza de la GRDI, esta fase de la EIS está compuesta por dos etapas: la construcción del listado de *stakeholders* y su cualificación. En primer lugar, por medio de la información recopilada en el estudio de base, del conocimiento atesorado por el equipo a cargo de la EIS y de la obtención de información primaria a partir de entrevistas con informantes-clave, debe generarse un *listado de*

stakeholders que incluya los principales actores de los tres grupos de afectación relacionados con la GRDI y sus correspondientes subgrupos: a) *tomadores de decisiones*; b) *unidades de exposición* (humanas, ambientales y materiales) o representantes de éstas; y c) *terceras partes*. Durante la configuración de este listado, los investigadores deben neutralizar los desequilibrios propios de la estructura social, evitando la infra o sobrerrepresentación de algunos *stakeholders* por razones sociales, políticas o económicas (lo más influyentes, representados, movilizados...). Una vez elaborado el listado de *stakeholders*, debe procederse a su cualificación por medio del análisis de sus condiciones y capacidades adaptativas. Este análisis debe abordar los siguientes tres ámbitos:

a) *Influencia*: grado de autoridad formal y/o poder que ostenta cada *stakeholder* para influir sobre el diseño e implementación de medidas y acciones de GRDI.
b) *Vulnerabilidad*: grados de sensibilidad y capacidad de adaptación de cada *stakeholder* para hacer frente a los efectos de la amenaza y recuperarse de los impactos negativos del desastre.
c) *Posicionamiento*: posición de favorabilidad de cada *stakeholder* con respecto al modelo vigente o propuesto de GRDI de cada caso de estudio.

La combinación de estas tres variables determina la posición estructural de cada *stakeholder* dentro del proceso de toma de decisiones asociado a la GRDI. Este entorno de gobernanza es denominado *socio-espacio de conflicto* (Aledo, 2018), y hace referencia a la movilización por parte de los *stakeholders* de estrategias políticas y discursivas basadas en el capital social, político, económico y cultural disponible orientadas a crear relaciones de alianza-oposición entre partes implicadas y adquirir una posición ventajosa en los procesos decisionales.

3.3. Análisis de impactos (fase 3)

El objetivo de esta fase es realizar un análisis profundo y exhaustivo de los impactos sociales experimentados por las unidades de exposición. Los resultados de esta fase no constituyen el fin último de esta propuesta metodológica, ya que su función no es la medición *per se* de los impactos, sino la identificación de dianas y vías estratégicas de GRDI. De igual forma, la función de esta tercera fase metodológica es producir un conocimiento exhaustivo sobre las características de los impactos con el que sustentar una identificación efectiva de medidas y acciones. Esta fase se compone de dos etapas: a) identificación de impactos; y b) evaluación de impactos.

3.3.1. Identificación de impactos

El objetivo de este apartado es la identificación de los impactos sociales del desastre, los cuales pueden ser *potenciales* (identificación predictiva) u *ocasionados* (identificación observacional). La identificación debe incorporar una perspectiva espaciotemporal amplia, que permita abarcar el análisis de impactos: a) experimentados a corto, medio y largo plazo; y b) delimitados en espacios primarios y secundarios de afectación. Así, debe ser superada la visión reduccionista de los impactos, por la cual tan solo son analizados los impactos asociados al momento y el espacio más inmediatos al episodio de inundación. La función de la EIS aplicada a la GRDI es precisamente dar cobertura analítica a las *zonas grises* del desastre, es decir, a los espacio-tiempos indirectamente vinculados a su eclosión, pero receptores de facto de sus consecuencias (ej. espacios secundarios de afectación y temporalidades a medio y largo plazo). Asimismo, debido a la naturaleza compleja de los impactos sociales, el proceso de identificación debe incorporar una perspectiva analítica de largo alcance, lo suficientemente profunda y holística como para abordar: a) formas de afectación de naturaleza intangible, en ocasiones sin fundamentación físico-material ni fácil mensurabilidad; y b) dinámicas de afectación acumulativa, a través de las cuales los impactos ya experimentados transforman las condiciones de vida de las unidades de exposición y dan lugar a nuevas configuraciones de vulnerabilidad social, determinando en última instancia las capacidades adaptativas para enfrentar los impactos a medio y largo plazo del desastre.

El carácter complejo de los impactos sociales hace necesario articular una estrategia de identificación

integral, que combine diferentes formatos de conocimientos y dé cuenta tanto del carácter subjetivo de los impactos, los cuales son definidos y experimentados a partir de la posición socio-estructural de cada *stakeholder* (Vanclay, 2002), como de la complejidad técnica y social de algunos impactos, que a menudo requiere de conocimientos altamente especializados. De esta forma, la identificación debe realizarse a través de la realización de:

a) *Revisión de fuentes de datos secundarios*: siempre y cuando haya disponibilidad, es conveniente realizar una primera consulta de datos procedentes de fuentes oficiales acerca de los impactos más inmediatos del desastre, que informe de aspectos esenciales tales como víctimas mortales y daños materiales e infraestructurales. Asimismo, mediante esta revisión debe establecerse una composición aproximada de las áreas socio-territoriales más y menos afectadas.
b) *Entrevistas a unidades exposición (experimentación)*: a fin de dar cobertura a la naturaleza subjetiva de los impactos, es necesario realizar entrevistas semiestructuradas a las unidades
c) de exposición para obtener información cualitativa sobre la experimentación de los impactos. Estas entrevistas han de realizarse mediante: a) un guión de temas basado en la información del estudio de base; y b) un mapa de actores extraído del análisis de *stakeholders* realizado en la fase anterior.
d) *Entrevistas a tomadores de decisiones (responsabilidad) y terceras partes (interés)*: esta vía de identificación, basada en el criterio de tomadores de decisiones y expertos, tiene una naturaleza complementaria en esta propuesta metodológica. Algunos impactos de alta complejidad o proyectados a largo plazo son difícilmente perceptibles y requieren de conocimiento especializado para ser identificados. Por ello, a fin de corregir o compensar algunas carencias o imprecisiones perceptivas, es conveniente complementar la identificación mediante entrevistas a tomadores de decisiones, tales como autoridades y representantes institucionales, técnicos de gestión y servicios de emergencia y a terceras partes, como es el caso de ONG, empresas de ingeniería hidráulica o expertos académicos.

Dado que las entrevistas están orientadas a la obtención de información cualitativa no estandarizada, cabe destacar que la identificación de impactos no siempre es dirigida y explícita. Los entrevistados no siempre identifican impactos de una forma consciente, ni tampoco los enuncian a modo de inventario. Por el contrario, durante las entrevistas algunos *stakeholders* se limitan a explicar en un formato coloquial y asistemático su percepción sobre el desastre. Esta circunstancia obliga al equipo a cargo de la EIS a auxiliar el proceso de identificación. Para ello, se lleva a cabo un proceso de codificación, por el que la información bruta o asistemática de las entrevistas es convertida en códigos que permiten una representación uniforme de los impactos. Este proceso debe culminar con la producción de un *listado de impactos sociales*. De acuerdo con la conceptualización de impactos sociales en al ámbito de la GRDI propuesta desde el Associated Programme on Flood Management (APFM) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), es conveniente categorizar el listado de impactos atendiendo a la siguiente clasificación:

a) *Pérdida de vidas y propiedades*: efectos inmediatos o a corto plazo provocados por las inundaciones, entre los que se encuentran las víctimas humanas, los daños materiales, el deterioro del tejido agrario o la destrucción o disfuncionamiento de infraestructuras estratégicas. Estos impactos normalmente son más severos en episodios de avenida o *flash-floods*.
b) *Pérdida de medios de subsistencia*: paralización de las actividades económicas como consecuencia del *shock* humano, material e infraestructural de la sociedad y el territorio afectados. La dislocación de los circuitos socioeconómicos cotidianos, junto con los costes de reparación y rehabilitación, puede traer consigo una pérdida y/o deterioro de los bienes y medios de subsistencia, que puede provocar un menoscabo del poder adquisitivo, no solo de los individuos directamente afectados, sino también de aquellos pertenecientes a zonas adyacentes con niveles de inundación menores o inexistentes.

c) *Procesos migratorios*: procesos migratorios o desplazamientos de población hacia otros puntos geográficos, bien de forma temporal o permanente. Estos enclaves de afectación secundaria, de acuerdo con sus condiciones socio-territoriales, pueden experimentar o acentuar problemas de ocupación irregular, hacinamiento del espacio urbano o saturación del mercado laboral, acompañados del consecuente riesgo de conflicto comunitario entre población local y foránea.
d) *Efectos psicosociales*: a partir de la experimentación del conjunto de impactos, los individuos se exponen al disfuncionamiento de sus relaciones sociales en todos sus niveles. Esta alteración de la cotidianidad puede comportar problemas psicológicos, tales como estrés, ansiedad o, en general, desequilibrios emocionales de diferentes tipos.
e) *Obstaculizar el crecimiento económico y el desarrollo*: de acuerdo con los niveles de desarrollo socioeconómico de la región afectada por un desastre por inundación, los impactos pueden fijarse en la sociedad y el territorio, dar lugar a nuevas vulnerabilidades socioeconómicas y producir una ralentización del crecimiento económico y el desarrollo regional. Cuando los episodios de inundación son recurrentes y se produce un proceso de acumulabilidad de impactos, la afectación sobre el desarrollo puede tener un alcance estructural.
f) *Consecuencias políticas*: costes asumidos por los representantes institucionales en forma de pérdida de confianza o apoyo por parte de la ciudadanía como consecuencia de los resultados de la gestión realizada en las fases pre, durante y post-desastre.

3.3.2. Evaluación de impactos

Esta fase de la EIS tiene por objetivo evaluar el conjunto de impactos identificados en la etapa anterior. La función evaluativa de esta propuesta metodológica no es llevar a cabo una medición, sino un análisis exhaustivo y profundo de sus características. El conocimiento obtenido de esta fase de evaluación constituye uno de los principales *inputs* informacionales para el proceso de formulación de alternativas de gestión de los impactos. Esta etapa de la EIS aplicada a la GRDI se constituye de dos procedimientos analíticos: a) análisis multicriterio; y b) desagregación causal de los impactos.

En primer lugar, el listado de impactos identificado en la fase anterior debe ser evaluado mediante un análisis multicriterio. A partir del manejo de criterios de evaluación, el objetivo de este análisis es descomponer, describir y analizar las propiedades y características básicas de los impactos, así como sus funciones y comportamientos a lo largo del espacio-tiempo de afectación y la red de impactos del desastre en su conjunto. Para llevar a cabo este análisis multicriterio, es conveniente, además de definir un sistema de cálculo matricial específico, emplear el siguiente conjunto de indicadores o criterios de evaluación:

a) *Receptor*: unidad de exposición que experimenta la afectación del impacto. Este criterio resulta fundamental, ya que establece el agente referencial sobre el que se basa el sentido valorativo de la evaluación del resto de criterios. La evaluación de los criterios no debe realizarse de forma general o en sentido abstracto, sino que debe abordarse tomando como referencia las condiciones y capacidades de adaptación de una unidad de exposición específica.
b) *Sentido*: significado valorativo de la afectación (positivo, negativo o neutro) experimentada por la unidad de exposición de referencia.
c) *Intensidad*: fuerza u orden de magnitud con el que un impacto afecta, en un sentido determinado, a la unidad de exposición de referencia.
d) *Fuente*: ámbito socio-territorial específico al que pertenece el principal foco inductor del impacto.
e) *Competencia*: organismo, ente o agente que ostenta la competencia de la gestión de la fuente o foco de inducción del impacto.
f) *Probabilidad*: grado de probabilidad de ocurrencia de los impactos potenciales que todavía

no han tenido lugar durante el ciclo del desastre.

g) *Temporalidad*: plazo de aparición de los impactos potenciales que todavía no han tenido lugar (corto, medio o largo plazo).
h) *Durabilidad*: tiempo de vida del impacto, es decir, estimación del tiempo transcurrido entre su aparición y su posible mitigación.
i) *Reversibilidad*: probabilidad de que una unidad afectada torne a su estado original o pre-desastre.
j) *Conflictividad*: grado de tensión social entre unidades de exposición, tomadores de decisión y terceras partes ocasionada por el impacto.
k) *Manejabilidad*: nivel de maniobrabilidad o viabilidad de gestión para llevar a cabo la mitigación del impacto.

Debido a la complejidad técnica de alguno de estos criterios, la evaluación participativa de los impactos a partir del conocimiento no especializado de las unidades de exposición puede incluir sesgos y no garantizar la suficiente validez. Por ello, es conveniente optar por un método mixto, por el cual: a) las unidades de exposición definen las características básicas del impacto (sentido e intensidad); y b) el equipo a cargo de la EIS, a partir del conocimiento sobre los impactos adquirido durante el proceso de investigación en su conjunto, evalúan el resto de los criterios.

Una vez evaluados los impactos, se lleva a cabo un proceso de *priorización* para establecer una división gradual entre impactos de alta y baja importancia. Este umbral de importancia, lejos de estar fundamentado en criterios objetivos, está determinado por las características axiológicas de la EIS, es decir, por su posicionamiento ético dentro de los ejes: a) *antropocentrismo-biocentrismo,* sobre el que descansa el reconocimiento de derechos y funciones de la naturaleza; b) *orden-desigualdad social*, el cual determina la posición frente a los grupos sociales vulnerables; y c) *reconstrucción-reestructuración*, a partir del cual se define el alcance y funciones de las medidas de recuperación post-desastre. Esta priorización puede realizarse mediante el empleo de criterios de ponderación. El resultado de este proceso de priorización debe ser un listado prioritario o *ranking* de impactos.

En segundo lugar, debe llevarse a cabo un análisis de la casuística de los impactos, especialmente de aquéllos definidos como prioritarios en el paso anterior. Este análisis consiste en desagregar cada uno de los factores causales integrados en el proceso generativo-modulador del impacto, así como en su eclosión. Mientras que la evaluación mediante criterios permite un conocimiento del estado y evolución del impacto, este análisis descompone sus causas generativas y permite identificar y configurar medidas y acciones de gestión con alcance efectivo. Así, deben ser analizados la influencia, peso causal y elementos de pertenencia de cada una de las principales variables que, a distintos niveles y desde diferentes dimensiones, componen el entramado casuístico de cada uno de los impactos, y que se concretan en:

a) *Amenaza*: nivel de peligrosidad de los focos de amenaza relacionados con el impacto objeto de análisis, fundamentalmente en lo relativo a la distribución espacio-temporal de la precipitación y a su comportamiento hidrogeomorfológico.
b) *Exposición*: influencia sobre la eclosión del impacto de la ubicación y proximidad de los asentamientos residenciales y las actividades económicas a los focos de amenaza.
c) *Vulnerabilidad (fuerzas locales)*: condiciones y capacidades adaptativas de tipo social, cultural y económico disponibles y no disponibles para el enfrentamiento del impacto objeto de análisis.
d) *Fuerzas supralocales*: macroestructuras ideológico-normativas y procesos sociales, económicos y políticos a los que responden las condiciones de vulnerabilidad social y la configuración socio-espacial del territorio.

3.4. Análisis de alternativas (fase 4)

Esta fase consiste en la propuesta y evaluación de medidas dirigidas a la gestión de los impactos del desastre por inundación. Dada la naturaleza proactiva de esta propuesta metodológica, todo el conocimiento sobre los impactos sociales obtenido hasta el momento (listados de *stakeholders*, listados de impactos y resultados de evaluación) desemboca en esta fase de la EIS a disposición de la identificación de ventanas estratégicas de actuación para la gestión de los impactos del desastre.

La etapa de formulación de alternativas en la EIS consiste en sistematizar un mecanismo de formulación de medidas y acciones de gestión para mitigar la afectación generada por los impactos del desastre. En función de la fase del ciclo del desastre en el que tenga lugar la EIS, de la capacidad para alcanzar acuerdos entre los *stakeholders* y del margen de maniobra sobre las estructuras socio-territoriales existentes, las alternativas de gestión pueden presentar diferentes grados de mitigación:

a) *Evitar-minimizar*: para aquellos impactos potenciales del desastre que todavía no han tenido lugar, medidas dirigidas a transformar sustancialmente o suprimir algún foco de riesgo para evitar su eclosión (ej. oferta de alternativa habitacional y asistencia social para personas que habitan viviendas con riesgo de derrumbe por los efectos de la inundación). Asimismo, este tipo de medidas de naturaleza preventiva también pueden aplicarse durante la fase de reestructuración post-desastre para reducir el riesgo de desastre en futuros episodios de inundación.
b) *Reparar*: para aquellos impactos ya ocasionados, medidas orientadas a la recomposición de la unidad afecta, bien devolviéndola a su estado pre-desastre o realizando cambios no estructurales (ej. rehabilitación de las viviendas afectadas, manteniendo su ubicación y características originales).
c) *Compensar*: medidas dirigidas exclusivamente a la compensación en especie o mediante indemnizaciones de las unidades de exposición afectadas, sin llevar a cabo una reparación de los entes afectos (ej. indemnización económica a las personas afectadas, sin posibilidad de recuperar la vivienda ni oferta de alternativa habitacional).

Para llevar a cabo la formulación de alternativas de gestión de los impactos del desastre, ha de llevarse a cabo un segundo proceso de participación con los *stakeholders*. Este proceso puede realizarse a partir de reuniones o talleres entre los principales representantes de cada uno de los tres tipos de *stakeholders*: unidades de exposición (asociaciones vecinales, grupos ecologistas, sindicatos, etc.), tomadores de decisiones (grupos políticos, representantes institucionales de organismos de gestión, etc.) y terceras partes (empresas, ONG, etc.). Este proceso de participación, además de constituir un ejercicio de comunicación social de los impactos ya acreditados del desastre, debe articular un proceso socialmente equilibrado de negociación de medidas efectivas de gestión que: a) dé cobertura a los impactos prioritarios identificados en la fase anterior; y b) emplee el conocimiento descriptivo (análisis multicriterio) y causal (análisis casuístico) para llevar a cabo la definición las características básicas y el alcance de las medidas de gestión. A fin de que el proceso de formulación sea sistemático, es necesario llevar a cabo una descripción detallada de cada una de las alternativas, que ofrezca información sobre:

a) *Acciones específicas*: actuaciones socio-territoriales concretas que componen las medidas de gestión.
b) *Características técnicas*: información sobre las dimensiones y formatos de materialización de las medidas y acciones de gestión.
c) *Plazos de gestión*: plazos para el diseño e implementación efectiva de las medidas y proyección de su tiempo de vida.
d) *Agentes involucrados*: *stakeholders* responsables de promover el diseño e implementación de las medidas, así como de llevar a cabo su ejecución y mantenimiento.
e) *Grupos sociales afectados*: grupos sociales afectados positiva y negativamente por el diseño e implementación de las medidas de gestión.
f) *Impactos-diana afectados colateralmente*: impactos que, de forma secundaria, experimentan

una alteración (maximizar o minimizar) de su nivel de afectación a partir del diseño e implementación de una medida.

g) *Fuentes de financiación*: fondos públicos y privados a escala local, regional, nacional e internacional disponibles para financiar las medidas y acciones.

Una vez formuladas y caracterizadas todas las alternativas de gestión, es necesario llevar a cabo una evaluación de su factibilidad, es decir, del grado de viabilidad que comporta el diseño, ejecución y mantenimiento desde el punto de vista:

a) *Legal*: licitud, tramitación burocrática y seguridad jurídica.
b) *Económico*: costes de implementación, gestión y mantenimiento de la medida y efectos de arrastre (afectación a otros sectores económicos).
c) *Territorial*: coordinación regional, condiciones demográficas, infraestructurales e hidrogeomorfológicas y lógica fluvial e hidrográfica.
d) *Ambiental*: daños sobre los recursos naturales, flora y fauna, servicios ecosistémicos y valor paisajístico.
e) *Social*: legitimidad y aceptación social, así como grado de consenso entre actores sociales implicados.

Así, esta fase debe incluir el diseño de mecanismos de monitoreo de la realidad post-EIS orientados a:

a) controlar la evolución de los impactos sociales detectados, tanto de aquéllos que han sido ocasionados como los de carácter potencial;
b) analizar la forma en que la afectación producida por los impactos puede transformarse en nuevas configuraciones de vulnerabilidad social; y
c) auditar el seguimiento de los acuerdos alcanzados en términos de medidas de gestión para garantizar su complimiento.

El método de monitoreo debe estar compuesto por indicadores que permitan operativizar los estadios evolutivos de los impactos, acuerdos y situaciones de vulnerabilidad y, en consecuencia, posibiliten la detección controlada de comportamientos no esperados.

Estos indicadores deben estar sustentados por información extraída de bases de datos secundarios, entrevistas semiestructuradas a informantes-clave pertenecientes a los tres principales bloques de *stakeholders*, y observación participante. La revisión y recogida de información debe ser periódica y debe realizarse por parte de un grupo o comité de monitoreo compuesto por diferentes representantes de los principales grupos de *stakeholders*. Los sistemas de monitoreo, además de detectar anomalías evolutivas, deben incluir mecanismos y fórmulas para llevar a cabo una corrección rápida y efectiva de los problemas identificados.

Por último, la EIS debe finalizar con la redacción de un informe final de resultados. Este informe constituye el *output* o producto tangible que acredita en un formato escrito y formal los resultados del proceso de investigación, favoreciendo así un arbitraje reglado de la realidad post-EIS.

4. CONCLUSIONES

Para concluir esta adaptación conceptual y metodológica a la EIS en el ámbito de la GRDI, es conveniente plantear tres reflexiones sobre los retos y oportunidades que conlleva tal integración. En primer lugar, es necesario tener presente la naturaleza eminentemente exploratoria de esta propuesta. Debido a la escasa literatura existente sobre EIS y desastres socioambientales, esta propuesta, aunque innovadora, requiere de mayores esfuerzos de adaptación teórico-conceptual. En este sentido, es conveniente analizar con mayor profundidad las convergencias y divergencias conceptuales que giran en torno a los binomios proyecto-amenaza natural, comunidad local-unidad de exposición y desarrollo-desastre.

En segundo lugar, es imperativo realizar una adaptación conceptual atendiendo al sentido axiológico, epistemológico y ontológico de la propuesta perseguida, reconociendo las bases paradigmáticas sobre las que descansa la forma de llevar a cabo la definición, evaluación y gestión de los impactos. Sin esta reflexión paradigmática, cualquier propuesta corre el riesgo de ser superada por los elevados niveles de complejidad, multidimensionalidad e incertidumbre que enfrenta el ámbito de los desastres socioambientales en su conjunto.

Por último, esta adaptación de la EIS a la GRDI propone la gestión proactiva de los impactos de los desastres, y para ello aborda de forma directa la elevada complejidad casuístico-generativa de los desastres en el marco de los sistemas socio-ecológicos, la desigual distribución social de los impactos y los elevados niveles de incertidumbre. En esencia, está propuesta está encaminada hacia la identificación estratégica de medidas para la reducción de la vulnerabilidad de los colectivos en riesgo y el fortalecimiento de su respuesta adaptativa.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del *Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario* (FPU) del Ministerio de Universidades español, a partir de la subvención concedida al segundo autor de este trabajo.

REFERENCIAS

- Aitsi-Selmi, A., Egawa, S., Sasaki, H., Wannous, C. and Murray, V. (2015). The Sendai framework for disaster risk reduction: renewing the global commitment to people's resilience, health, and well-being. *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 164-176.
- Aledo, A. (2018). El socio-espacio de conflicto. Un marco conceptual para el análisis de los conflictos asociados a riesgos tecnológicos. En: Vallejos-Romero, A., Valencia, J., Boso, *Riesgos, gobernanza y conflictos socioambientales*, 43-68. Ediciones Universidad de la Frontera, Santiago de Chile.
- Aledo, A. and Domínguez-Gómez, J. A. (2017). Social Impact Assessment (SIA) from a multidimensional paradigmatic perspective: challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*, 195, 56-61.
- Aledo, A. y Domínguez-Gómez, J. A. (2019). *Evaluación de Impacto Social: Teoría, Método y Casos*. Publicacions de la Universitat d'Alacant, Alicante.
- Aledo, A. y Sulaiman, S. (2014). La incuestionabilidad del riesgo. *Ambiente & Sociedade*, 17, 9-16.
- Allan, C., Curtis, A. and Mazur, N. (2006). Understanding the Social Impacts of Floods in Southeastern Australia. *Advances in Ecological Research*, 39, 159-174.
- Ayala-Carcedo, F. J. (2000). La ordenación del territorio en la prevención de catástrofes naturales en la geografía española. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 37-49.
- Aznar-Crespo, P., Aledo, A. and Melgarejo-Moreno, J. (2020). Social vulnerability to natural hazards in tourist destinations of developed regions. *Science of the Total Environment,* 709, 135870.
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., ... and Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural hazards*, 67, 193-211.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B. (1994). *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge, London.
- Brouwer, R. and Van Ek, R. (2004). Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands. *Ecological Economics*, 50, 1-21.
- Camarero, C. and Olcina, J. (2020). The Mediterranean, a hazard-region. Climate change, vulnerability, resilience". En: Gómez-Cantero, J., Morán, C., Losada, J. and Carnelli, F, *The climatic crisis in Mediterranean Europe: Cross-Border and Multidisciplinary Issues on Climate Change*, 8-13. Il Sileno Edizioni, Lago.

- Cannon, T., Twigg, J. and Rowell, J. (2003). Social vulnerability: sustainable livelihoods and disasters. Report to DFID Conflict and Humanitarian Assistance Department (CHAD) and Sustainable Livelihoods Support Office.
- Climent-Gil, E., Aledo, A. and Vallejos-Romero, A. (2018). The social vulnerability approach for social impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 73, 70-79.
- Craig, D. (1990). Social impact assessment: politically oriented approaches and applications. *Environmental Impact Assessment Review*, 10, 37-54.
- CRED (2010). EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Data Base. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université Catholique de Louvain, Louvain.
- Dryzek, J. S. (1990). *Discursive democracy: Politics, policy, and political science*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Esteves, A. M., Franks, D. and Vanclay, F. (2012). Social impact assessment: the state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 30, 34-42.
- Funtowicz, S. and Ravetz, J. (2000). La ciencia posnormal: ciencia con la gente. Icaria, Barcelona.
- Guggenheim, M. (2014). Introduction: disasters as politics-politics as disasters. T*he Sociological Review,* 62, 1-16.
- Hartman, C. and Squires, G. (2006). *There is no such thing as a natural disaster: race, class and Hurricane Katrina*. Routledge, New York.
- Kelman, I. (2015). Climate change and the Sendai framework for disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 117-127.
- Marshall, B. K. and Picou, J. S. (2008). Postnormal science, precautionary principle, and worst cases: the challenge of twenty-first century catastrophes. *Sociological Inquiry*, 78, 230-247.
- Ribot, J. (2014). Cause and response: vulnerability and climate in the Anthropocene. *Journal of Peasant Studies*, 41, 667-705.
- Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G. and Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 470-486.
- Sardar, Z. (2010). Welcome to postnormal times. *Futures*, 42, 435-444.
- Serje, M. (2017). Social relations: a critical reflection on the notion of social impacts as change. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 139-146.
- Stirling, A. (2003). Risk, uncertainty and precaution: some instrumental implications from the social sciences. En: Berkhout, F., Leach, M. and Scoones, I, *Negotiating Environmental Change: New Perspectives from Social Science*, 33-76. Edward Elgar, Cheltenham.
- Usman, R. A., Olorunfemi, F. B., Awotayo, G. P., Tunde, A. M. and Usman, B. A. (2013). Disaster risk management and social impact assessment: understanding preparedness, response and recovery in community projects. En: Silvern, S. and Young, S, *Environmental Change and Sustainability*, 259-274. IntechOpen, London.
- Vanclay, F. (2002). Conceptualising social impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 22, 183-211.
- Varda, D. M. Forgette, R. Banks, D. and Contractor, N. (2009). Social network methodology in the study of disasters: issues and insights prompted by post-Katrina research. *Population and Policy Review*, 28, 11-29.
- Wachinger, G., Renn, O., Bianchizza, C., Coates, T., De Marchi, B., Domènech, L ... and Pellizzoni, L. (2010). Risk perception and natural hazards. WP3-Report of the CapHaz-Net Projekt.
- Wahlström, M. (2015). New Sendai framework strengthens focus on reducing disaster risk. *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 200-201.
- Walker, G. (2010). Environmental justice, impact assessment and the politics of knowledge: the implications of assessing the social distribution of environmental outcomes. *Environmental impact assessment review*, 30, 312-318.
- Weidema, B. P. (2006). The integration of economic and social aspects in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 89-96.

- Wilhite, D. A. (2005). *Drought and water crises: science, technology, and management issues*. Crc Press, Boca Ratón.
- Yasuhara, K., Komine, H., Yokoki, H., Suzuki, T., Mimura, N., Tamura, M. and Chen, G. (2011). Effects of climate change on coastal disasters: bew methodologies and recent results. *Sustainability Science*, 6, 219-232.

LAS NUEVA ESTRATEGIA DEL DERECHO EN LA REGULACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RIESGOS DE INUNDACIONES

José Esteve Pardo
Catedrático de Derecho Administrativo, Universidad de Barcelona, España

1. EL CAMBIO DE ORIENTACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE LA NATURALEZA Y SUS RECURSOS. DE LA EXPLOTACIÓN RACIONAL A LA ORIENTACIÓN ECOLÓGICA

En las últimas décadas se han producido transformaciones en la relación entre la sociedad y la naturaleza. Una nueva sensibilidad, atenta a la fragilidad de los sistemas naturales, y una conciencia ecológica ya muy arraigada propician una nueva percepción de la naturaleza que, más pronto o más tarde, acaba reflejándose en el derecho.

Este cambio es perceptible en todas las regulaciones que inciden sobre los llamados recursos naturales, según la expresión que figura en la Constitución Española: "Los poderes públicos velarán por la utilización racional de todos los recursos naturales, con el fin de proteger y mejorar la calidad de la vida y defender y restaurar el medio ambiente, apoyándose en la indispensable solidaridad colectiva" (artículo 45.2).

Todas las leyes y normas dictadas en las tres últimas décadas configuran para estos recursos un régimen muy distinto al que regía durante los cien años anteriores, montado sobre otros conceptos y referencias. Una transformación de tal entidad que comporta en rigor un auténtico cambio de paradigma. A grandes rasgos puede decirse que se ha transitado de un régimen que pivotaba sobre el paradigma de la explotación racional a otro marcado por la orientación ecológica del derecho.

La noción de "explotación racional" de los recursos naturales que, como acabamos de comprobar, es la que luce en la Constitución, fue originariamente acuñada por la ciencia forestal alemana del siglo XIX y tiene una marcada orientación protectora: un recurso natural debe explotarse de tal modo que puede mantenerse en su estado natural, se está contemplando así un modo de explotación y aprovechamiento de la naturaleza y sus recursos que hoy llamaríamos sostenible.

La orientación ecológica, muy pujante o dominante en las últimas décadas, pretende que la regulación por el derecho de la naturaleza y sus recursos siga y se ajuste a la propia orientación natural, la que marquen los procesos ecológicos esenciales. Es un nuevo paradigma que parte de la crítica al de la explotación racional que se tilda de antropocéntrico. Pero como ya he podido destacar en otros estudios, esta crítica no está fundada pues la llamada orientación ecológica es también genuinamente antropocéntrica pues la naturaleza y sus recursos, las plantas, los animales, los cursos fluviales, los bosques, no tienen capacidad de expresión. Son seres humanos los que se erigen en portavoces de la naturaleza. Es evidente que un río no nos dice cuál es su caudal ecológico, ni un monte o terreno forestal cuáles son sus especies autóctonas, ni un oso cuál es su área de campeo. Es evidente que son seres humanos los que determinan en cada caso estos conceptos –caudal ecológico, especies forestales autóctonas, áreas de campeo de especies amenazadas- y tantos otros que parecen mostrar una sujeción del derecho a lo que marque la naturaleza, a referencias ecológicas, cuando en realidad son seres

humanos, ordinariamente técnicos de las Administraciones, los que interpretan la naturaleza y se erigen en sus portavoces, con interpretaciones que no son siempre unánimes, pues difieren considerablemente según sea la formación e ideas de diversos colectivos de técnicos que operan sobre los recursos naturales. Son bien conocidas así , por ejemplo, las abiertas discrepancias que en torno a la ordenación, gestión y explotación de recursos forestales han mantenido, y mantienen todavía en algún caso, los gestores públicos tradicionales, los Ingenieros de Montes, con otros colectivos de técnicos y funcionarios públicos más recientes, formados en nuevas titulaciones universitarias en torno a las ciencias de la ecología. Igualmente veremos las abiertas discrepancias que los Ingenieros de Montes mantuvieron en torno al tema que nos ocupa, el de las inundaciones y las estrategias para evitarlas, con otro cuerpo especial de funcionarios, el de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

También con relación a fenómenos y peligros naturales, como son las inundaciones, se ha producido un cambio de perspectiva y de estrategia por parte del derecho. Entre esas transformaciones hay dos, del todo fundamentales, que quiero tratar aquí. La primera afecta a los cursos fluviales, que están en el origen de las inundaciones. La segunda, muy conectada a ella, afecta a la propia concepción de los riesgos naturales y el tratamiento que reciben en el marco de la nueva sistemática de la gestión de riesgos.

2. LA ORIENTACIÓN ECOLÓGICA Y LA RECUPERACIÓN DEL ESTADO NATURAL DE LOS CURSOS FLUVIALES.

2.1. La liberalización y desregulación de los ríos y cauces fluviales. Un objetivo limitado

Con relación a los ríos, a los cursos fluviales, la tendencia es la propia de la orientación ecológica a la que me refería. Se trata de devolver a los ríos a su estado natural, de eliminar en lo posible la intervención humana sobre ellos, de liberalizar los ríos, de desregularlos, en una línea muy similar a la de las corrientes doctrinales, actualmente muy en boga en el ámbito económico, que propugnan la liberalización de sectores económicos y la retirada de la intervención pública, su desregulación.

Todo el desarrollo industrial, de generación de energía, de necesidades de abastecimiento de agua a poblaciones, de regadío, de obras públicas en sus cauces e inmediaciones y, también, la misma protección y prevención de frente a inundaciones ha conducido a una intensa regulación de muchos ríos que han perdido así sus rasgos naturales genuinos. Pues bien, toda una línea de actuación, programada por normas diversas, se orienta ahora a la recuperación de sus cauces y sus dinámicas naturales. Una orientación que se inicia, muy significativamente, en los países en los que el desarrollo técnico e industrial ha sido más intenso, como Francia, Alemania o los Estados Unidos, coincidiendo también con el tránsito a otras tecnologías o infraestructuras que permiten prescindir de las existentes hasta entonces en los ríos y sus cauces. En muchos casos se toma como indicador de referencia la recuperación de la fauna piscícola y de sus movimientos o migraciones como las que realizan los salmones. En Estados Unidos se produjeron movimientos sociales y ecologistas con estas demandas y en algunos ríos de mucho caudal –es el caso del Columbia- se han retirado grandes presas y otros obstáculos debidos a la intervención humana para conseguir que los salmones vuelvan a remontar su curso. En Francia es de destacar la recuperación para el salmón de todo el curso de un río de largo recorrido, como es el Allier, cuyo nacimiento se sitúa a poco más de un centenar de kilómetros del Mediterráneo para desembocar en el Loira que finaliza su curso en el Atlántico, por la región de Bretaña.

Por supuesto, todas las actuaciones dirigidas a eliminar la intervención humana en los cursos fluviales -que en no pocos casos es una intervención protectora frente a peligros de inundaciones con la construcción de obras de canalización y contención- plantean importantes problemas, puesto que el cauce del río y los planos de inundación se ensancharían considerablemente en espacios que están

ocupados por cultivos, edificaciones, industrias y asentamientos humanos, en definitiva. La recuperación del cauce natural de los ríos se presenta así, desde el más elemental realismo, como un objetivo del todo inalcanzable en su plenitud; habría que trasladar poblaciones, industrias, y todo tipo de actividades y asentamientos que pudieran verse afectados. Tendría todo ello unos costes económicos –habría que indemnizar, expropiando en su caso- y sociales, por previsibles rechazos en amplios sectores, que no podrían asumirse en su totalidad.

La realidad muestra bien a las claras que la recuperación de los cauces naturales de los ríos sólo resulta factible en tramos fluviales determinados y que el criterio de actuación para ello no es tanto la relevancia ecológica de ese tramo fluvial sino, sobre todo, los costes económicos y sociales que pudiera comportar. En la práctica, la actuación de las Administraciones públicas competentes –que son fundamentalmente las Administraciones de las Comunidades Autónomas- se desarrolla del modo siguiente: se elabora una relación de tramos en función de su relevancia ecológica y se actúa solo en aquellos que presentan unos costes asumibles, generalmente los tramos que están circundados por terrenos de escaso valor. Y el mejor escenario se da cuando esos terrenos son de titularidad pública, como son muchos de los montes y espacios forestales en sus diversas categorías jurídicas, comenzando por los montes catalogados. Particular interés merece la categoría de los montes protectores, que se sitúan bajo la titularidad pública, pues entre ellos se encuentran los de las cuencas altas de los ríos que alimentan pantanos y otros tipos de montes que están en las riberas de los cursos fluviales.

En cualquier caso, el cambio de perspectiva se insinuó ya muy claramente con la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuaciones en el ámbito de la política de aguas. En ella se programa la progresiva reducción de las "aguas artificiales" y las "aguas modificadas". Pues bien, la consideración de las aguas fluviales represadas o reguladas por obras sobre el caudal como "aguas artificiales" o "aguas modificadas" es muy clara en la propia Directiva que en su artículo 3 establece que los Estados miembros podrán calificar como tales las aguas fluviales que hayan sido objeto de intervención en sus características hidromorfológicas.

Es así como se están realizando actuaciones singulares de recuperación de los cauces naturales de los ríos por parte de las Administraciones competentes, que son las de las Comunidades Autónomas, mostrándose unas más activas que otras lo que está en función sobre todo de la diferente disponibilidad de terrenos de titularidad pública tal como se apuntaba más. En cualquier caso, esas actuaciones tienden a enmarcarse en una planificación de espacios fluviales en la que se incorpora ya esta perspectiva de "liberalización", de "desregulación" de los ríos para la restauración de su cauce natural.

En esa planificación se establecen tres zonas:

- La zona fluvial que incluye el cauce y sus riberas, determinada a partir de la avenida de retorno de 10 años. Viene muy condicionada por la franja de vegetación de ribera mínima para conseguir el buen estado ecológico.
- La zona del sistema hídrico es la franja de terreno por la cual discurre preferentemente el flujo de las avenidas con un componente de velocidad significativa. Se determina a partir de la línea de inundación de la avenida de periodo de retorno de 100 años. Esta zona debería quedar libre de construcciones, edificaciones y modificaciones del perfil actual del terreno. Sería no obstante compatible con los usos agrícolas, zonas verdes o de ocio, siempre que no comporten afectaciones al régimen de corrientes en avenidas.
- La zona inundable para episodios extraordinarios se extiende a la superficie máxima tocada por las aguas de inundación en un periodo de retorno de 500 años. En esta zona prima la componente de desbordamiento lateral sobre la de velocidad apreciable. Se pueden distinguir

en ella a su vez tres zonas: Zona de inundación leve, zona de inundación moderada y zona de inundación grave. En esta última no se admitirán ni áreas de acampada, ni servicios de camping, ni ningún tipo de edificación.

2.2. El debate sobre las obras de contención y su eliminación

Es de destacar que en ninguna de estas tres zonas se contemplen las obras de contención y canalización como defensa frente al peligro de inundación. Obras con estas características y funciones se han venido construyendo sobre todo a partir del siglo XIX con el fuerte impulso que entonces reciben las obras públicas con una legislación –sobre todo la Ley de Obras Públicas y la Ley de Expropiación Forzosa- que les da firme cobertura y un cuerpo especial y prestigioso de funcionarios: los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Este poderoso cuerpo mantenía que el modo de evitar las inundaciones eran las obras de contención y canalización, sobre todo en los cursos medio y bajo de los ríos. Se entabló entonces una polémica con otro cuerpo especial también muy poderoso, el de los Ingenieros de Montes, para los que la solución o reducción del problema de las inundaciones era la repoblación forestal de las cuencas altas de los ríos, sobre todo en las cuencas del Levante mediterráneo, donde las inundaciones producían grandes catástrofes y numerosas víctimas. Unas catástrofes que causaban una gran consternación en Europa por lo que en se organizaron espectáculos y fiestas para recaudar fondos para los damnificados, sobre todo en París, la capital cultural europea a finales del XIX y principios del XX. En ellas -en "la fiesta Paris-Murcia, a beneficio de los damnificados por las inundaciones de Murcia" sitúa Marcel Proust a Odette y otros personajes en el primer volumen de En busca del tiempo perdido. Y debieron de organizarse varias, en épocas distintas, pues Gustave Flaubert e Ivan Turgenieff, que son de una generación anterior al relato de Proust, se conocieron, como ellos mismos recuerdan en su abundante correspondencia, en una de estas fiestas para recabar fondos por las inundaciones de Murcia, tal como un siglo más tarde Bob Dylan, George Harrison y compañía organizaban festivales en Nueva York a beneficio de Bangla Desh y otras regiones devastadas, que en el XIX todavía resultaban muy remotas para las vanguardias artísticas europeas.

Tras esta breve digresión literaria, ha de notarse que la ausencia de referencias a las obras de contención y protección ante riesgos de inundación insinúa ya muy claramente una nueva estrategia u orientación. No se aspira ya a la eliminación total del riesgo, dominando los cursos fluviales con obras de protección (que en la práctica originan muchas veces alteraciones en las corrientes y generan nuevos peligros) sino que se aspira al objetivo, posiblemente más pragmático y realista, de admitir la existencia de un riesgo y establecer fórmulas y mecanismos para gestionarlo eficazmente, como son, destacada y significativamente, los planes de gestión de riesgos de inundaciones.

Esa estrategia se adopta muy resueltamente en Europa con la "Directiva de inundaciones" cuya transposición al derecho interno se efectuó fundamentalmente por el Real Decreto 9/2008 que desarrolla y perfila los instrumentos de evaluación de riesgos y planes de gestión de riesgos de inundaciones".

Se opera aquí también, en la acción pública ante el peligro de inundaciones, el tránsito de la policía administrativa a la regulación de riesgos. Una evolución ya muy común y consolidada en lo que genéricamente puede entenderse como la acción pública, administrativa, por razones de seguridad. La policía administrativa se orienta al mantenimiento del viejo concepto de orden público, un estado ideal y muchas veces utópico de paz. Mientras que el objetivo más realista, pragmático y actual de la regulación de riesgos parte de la idea de que hemos de convivir con los riesgos y de lo que se trata es de regularlos y gestionarlos. Nos pone ello en contacto con el otro punto de atención de esta ponencia que es la teoría de la regulación de riesgos y su aplicación a los problemas que suscitan las inundaciones.

3. LA APLICACIÓN A LOS PELIGROS Y RIESGOS DE INUNDACIONES DE LA TEORÍA Y RÉGIMEN DE LA REGULACIÓN DE RIESGOS

El extraordinario interés que la temática del riesgo suscita desde hace un tiempo en las ciencias sociales y jurídicas parece acaparado por el riesgo tecnológico, el riesgo antrópico, pues cualquier tecnología es producto de la intervención humana. La atención que suscita estaría justificada por ser la expansión generalizada y envolvente de este riesgo tecnológico el punto de inflexión en la historia de la humanidad que ha sido, desde sus inicios, la de la lucha constante por dominar la naturaleza, sus peligros, sus limitaciones, sus inescrutables designios. Y el instrumento utilizado para ello no ha sido otro que la técnica, que sólo los seres humanos se han mostrado capaces de desarrollar y aplicar. Como certeramente la definía José Ortega y Gasset, "la técnica es la reforma de la naturaleza, de esa naturaleza que nos hace necesitados y menesterosos". Una técnica que ha logrado reducir y dominar muchos peligros naturales, como los vinculados a las necesidades de energía, de alimentación, o a muchas enfermedades y epidemias, mediante la tecnología energética, alimentaria o farmacéutica, por mencionar sólo algunos sectores. Así es como en las últimas décadas se ha dado ese giro que nos encara con los riesgos derivados de las tecnologías que hemos desarrollado para reducir los peligros de la naturaleza y extraer de ella lo que convenga para satisfacer nuestras desmedidas necesidades. Sólo en el frente de la energía nos encontramos con los riesgos asociados a la industria nuclear o los efectos de las modalidades de generación a partir de materias fósiles, con su relevante contribución al calentamiento global. Éste, el del cambio climático, es otro de los detonantes o aldabonazos que parecen anunciar la entrada en una nueva era: la comunidad científica reconoce que, por vez primera, puede considerarse la actividad humana como una de las causas del cambio climático, aunque luego el consenso científico se rompe cuando se trata de determinar el alcance real del cambio climático, sus efectos y -con mayor discrepancia todavía- las medidas que se consideren adecuadas para neutralizarlo o minimizar sus consecuencias negativas.

3.1. La cuestión de los peligros y riesgos tecnológicos

La atención se ha concentrado así en los riesgos derivados de la acción humana que, por las nuevas dimensiones globales y atemporales -desde luego transgeneracionales- en las que se sitúan, son vistos por muchos como indicios, cuando no evidencias, de la entrada en una nueva fase, llámese sociedad del riesgo, postmodernidad o como se quiera denominar. Quedaban así del todo eclipsados, faltos de una atención renovada y actual, los riesgos naturales, generados directamente por la naturaleza y sus fuerzas, sin intervención o causalidad humana alguna. Entre ellos los peligros derivados de inundaciones que se producen de manera recurrente y con daños catastróficos en no pocas ocasiones.

No parecía registrarse ante ellos una reacción significativa de los juristas, en abierto contraste con la que se dispensaba a los riesgos industriales que llegan a erigirse en el centro de atención de nuevas y pujantes disciplinas jurídicas como es el Derecho del Medio Ambiente en el que bien pueden advertirse dos líneas de actuación: la primera, contra la contaminación en todas sus modalidades -atmosférica, acústica, de aguas, de suelos, lumínica, etc.- debida a la actividad humana, mayormente industrial, sin que ni se contemple, ni se trate, la contaminación producida por causas naturales, como la producida por una erupción volcánica, que puede tener por lo demás un considerable efecto climático. Lo mismo puede decirse de la segunda línea del Derecho ambiental, enderezada a la protección en su estado natural de ciertos espacios y recursos; una protección que se levanta exclusivamente ante la acción humana, que puede verse considerablemente amplificada por los medios técnicos, pero no ante la acción de unas fuerzas naturales que pueden resultar más destructivas.

Esta posición hasta cierto punto abstencionista, neutral, del Derecho y los juristas ante los peligros o riesgos naturales se explica en el fondo por la situación en la que éstos se localizan: fuera de la órbita de disposición y decisión humana. Allí donde no llega la decisión, la intervención humana, nada tendría que decir el Derecho, el orden jurídico, al menos el que todavía rige en la cultura occidental

desde la modernidad. Ninguna norma puede aplicarse, ninguna intervención pública plantearse, ninguna responsabilidad exigirse allí donde no hay actuación humana y sólo operan las fuerzas la naturaleza impulsadas por designios insondables que siguen produciendo graves catástrofes.

Pero recientemente estos planteamientos se están revisando en profundidad, y esa es una de las principales aportaciones de este importante libro, a partir de diversas constataciones. Dos de ellas, fundamentales, pueden destacarse aquí. La primera repara en la acción del *homo faber* sobre el medio natural; la segunda, en los conocimientos sobre la naturaleza y sus procesos ha conseguido adquirir el *homo sapiens*.

La acción e intervención humana ha mediatizado sustancialmente la acción de las fuerzas de la naturaleza como es claro en el caso que nos ocupa. Si se sobrevuela una región remota, apenas afectada por la acción del hombre, basta contemplar el cauce de un río, con su considerable extensión y sus ramificaciones que cambian continuamente su trazado, para percatarse como en nuestros urbanizados territorios los ríos y cursos de agua están completamente encauzados, intervenidos, regulados por una intensa y constante actuación humana. La causación de cualquier catástrofe producida por un súbito aumento del caudal podrá asignarse ciertamente a unas lluvias torrenciales, pero lo más frecuente es que operen de manera decisiva otros factores causales debidos a esa intervención antrópica, desde unas obras que estrechan el cauce aumentando así la potencia de los flujos, hasta la rotura de un azud o cualquier obra de contención, pasando por los efectos que puedan tener otras obras más alejadas, como ha sido el caso de autopistas que actúan como presas y provocan que toda una zona urbana quede anegada por las aguas. Se han permeabilizado las fronteras entre un supuesto espacio sujeto en exclusiva a las fuerzas de la naturaleza y otro entregado a la plena intervención de las fuerzas sociales. La relación entre fuerzas naturales y acción humana se ha hecho de ese modo muy promiscua. Así, con relación a los ríos, por seguir con este sector, se observa, como ya hemos destacado, una marcada tendencia desreguladora que, al igual a la que se ha proyectado sobre la actividad económica y jurídica, propugna la retirada de trabas, que no son aquí normas o trámites administrativos, sino instrumentos reguladores -intervencionistas- de los ríos como son presas, obras de contención, de canalización, azudes, infraestructuras contiguas, urbanizaciones, etc. En cualquier caso, ese movimiento desregulador, iniciado en Estados Unidos hace unos años, y programado también en Europa por diversas Directivas cuyo objetivo es lo que aquí se conoce como la restauración de ríos -su devolución al estado natural o buen estado ecológico- pivota exclusivamente sobre la acción de los técnicos y se debe por completo a lo que ellos decidan y ejecuten. Los ríos continuarán así, todavía más, bajo una intervención humana que ahora se decide cambiar de orientación con las actuaciones de restauración: se pretenden eliminar obras e infraestructuras de contención y establecer como instrumentos de protección modernos planes de gestión de riesgos, que nos ponen en contacto con la otra transformación relevante en la materia.

La segunda constatación, posiblemente de mayor sustancia y a la postre mayor complejidad jurídica, repara en el creciente conocimiento de que disponemos sobre los peligros o riesgos naturales, lo que permite encuadrarlos, en muy buena medida, en la bien establecida sistemática de tratamiento jurídico de los riesgos tecnológicos, que está compuesta por tres fases en las que se pretende dar respuesta a los principales retos que plantean al Derecho.

3.2. En los riesgos naturales no existe la fase de decisión, pero sí las de la gestión y la responsabilidad

La primera fase es la decisión sobre el riesgo que se acepta y el que se rechaza. Está desde luego en nuestra mano tal decisión, pues la tecnología siempre es el resultado actuaciones y manipulaciones realizadas por personas. El riesgo que se acepta, aquel con el que estamos dispuestos a convivir, es lo que se conoce como riesgo permitido. Un concepto que ha devenido del todo central en el Derecho penal, en el Derecho de daños y, por supuesto, en el Derecho público, donde ha desplazado el

concepto de orden público como referente de la tradicional policía administrativa que tiende a ser hoy regulación de riesgos.

Esta primera fase de decisión no puede cumplimentarse cuando nos encaramos con riesgos naturales. Es evidente que no decidimos sobre ellos -sobre un aguacero, sobre un terremoto, sobre la erupción de un volcán- pues nos vienen dados por la naturaleza. Pero sí que resultan de plena aplicación las otras dos fases: la de la gestión del riesgo y la de las posibles responsabilidades.

La gestión del peligro o riesgo natural puede -y debe- a su vez desarrollarse en dos momentos: el momento previo, anterior por tanto a la producción del daño, y el que se abre cuando se desata el potencial destructivo de las fuerzas naturales para tratar de neutralizarlo o minimizarlo en lo posible. Con relación a los riesgos de inundaciones esos dos momentos están perfectamente definidos con instrumentos muy característicos para operar en uno u otro. Así en la fase de la prevención se ha destacado la relevancia de los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundaciones o los planes de prevención, mientras que en el momento crítico de la emergencia en el que se producen las grandes avenidas y precipitaciones son los planes de gestión de riesgos los que adquieren el mayor protagonismo.

Sin duda, el principal valor o activo para la gestión de los riesgos, ya sean naturales o tecnológicos, es el conocimiento. Por definición, el riesgo es incierto y por ello, a medida que se progresa en su conocimiento, se reduce el margen de riesgo. Sobre los riesgos naturales ese conocimiento se ha ampliado muy considerablemente con los avances de ciencias como la geología, la climatología, la sismología, la hidrología, la meteorología, la vulcanología, que se benefician de la innovación tecnológicos que ofrecen instrumentos muy útiles para conocer los fenómenos naturales avanzando así en el desencantamiento de la naturaleza. Estos conocimientos incrementan considerablemente la efectividad de las actuaciones, absolutamente claves, orientadas a la prevención, detección, y transmisión de información sobre peligros naturales. Pero también el conocimiento histórico se ha visto amplificado con la utilización de computadoras y programas informáticos que permiten apuntar, con una precisión desconocida hasta ahora, hacia lo que resulta probable y previsible en el futuro. Unos datos históricos y unas previsiones que permiten elaborar instrumentos como los mapas de riesgos, cada vez más exactos.

La gestión de los riesgos naturales abarca medidas muy diversas, como muestra la rica exposición que en este libro se ofrece, que van desde la elaboración de planes y protocolos de actuación, y la adecuada ejecución de los mismos, hasta la construcción de obras públicas y edificios con arreglo a normas técnicas y con materiales que se saben eficaces en la neutralización o reducción de riesgos.

La otra fase en la que pueden situarse y valorarse los riesgos naturales es la de la responsabilidad. Una responsabilidad que no resulta exigible a las decisiones sobre aceptación del peligro, que ya sabemos no las hay -a diferencia del riesgo tecnológico sobre el que puede decidirse el nivel de riesgo permitido-, pero sí a las medidas, actuaciones y omisiones relativas a la gestión de los riesgos naturales.

Pareciera que la responsabilidad ha de ser ajena a un entorno dominado por los designios inescrutables de la naturaleza y es esa paradoja la que resuelve la noción de modernidad reflexiva que acuñara Ulrich Beck. Resulta que, en contra de lo que se pensaba durante la primera y optimista época de la modernidad, el progreso no es lineal: en cualquier momento se puede volver contra nosotros en un giro reflexivo, como un boomerang. Ese giro ha dado el tejido industrial y tecnológico cuando ha mostrado su potencial de riesgo, o su lado oscuro en sus negativos efectos sobre el medio ambiente. Pero también el avance en el conocimiento científico, que parece un progreso puro y noble, puede volverse contra nosotros de otro modo: al incrementar nuestros conocimientos, nos cargamos también

con responsabilidades. Cuanto mayores son nuestros conocimientos en materia de sismología, cuanto más precisos los instrumentos de que disponemos, mayores responsabilidades se nos puede exigir por no haber previsto un terremoto. Unas responsabilidades, sobre todo de la Administración, que pueden extenderse a actuaciones y decisiones suyas como puedan ser la aprobación de planes urbanísticos, el otorgamiento de licencias de edificación, o de instalación de un camping, en zonas inundables.

Es así como estas responsabilidades se están planteando ya en todos sus posibles frentes. Se han exigido en unos casos responsabilidades políticas por mala gestión de las autoridades. Responsabilidad de la Administración, con una abundante jurisprudencia que la reconoce en caso de inundaciones. Responsabilidad civil, por supuesto. Y responsabilidad penal que en algún caso ya se ha descargado, novedosa y controvertidamente, sobre el estamento científico. El primer caso se suscitó, con gran impacto, tras el terremoto de L'Aquila, en Italia, en el año 2009 en el que fallecieron más de trescientas personas. El Tribunal penal de primera instancia condenó a seis años de prisión a siete científicos de la Oficina de Riesgo Sísmico de Protección Civil. Aunque se trataba fundamentalmente de una cuestión de gestión de riesgos, sobre todo de su comunicación a la población, y que la sentencia fue revocada en el 2014 por el Tribunal de segunda instancia, declarando inocentes a los geólogos y sismólogos, no puede dejar de advertirse aquí ese movimiento característico de la modernidad reflexiva que se vuelve contra el progreso -el más noble aquí, el progreso científico- y que tiende a incrementar nuestras responsabilidades cuanto más ampliamos nuestros conocimientos, sobre riesgos sísmicos en este caso.

En cualquier caso, el estudio y la gestión de estos riesgos requiere de un enfoque interdisciplinar ante la especialización de los conocimientos que concurren en esta realidad. Estamos muy lejos de aquella época en la que algunas mentes privilegiadas eran capaces de reunir todos los conocimientos para abordar con rigor científico los retos de los riesgos naturales. Así se encararon con ellos Leibnitz, Blaise Pascal y el matemático y jurista, Fermat, a los que se debe un instrumento tan útil como el cálculo de probabilidades. Pero el progreso en el conocimiento, con la consiguiente especialización, hace imprescindible hoy la colaboración interdisciplinar para ampliar nuestro conocimiento que es a la postre el modo más efectivo de reducir los riesgos y la incertidumbre que los envuelve.

REFERENCIAS

- Esteve Pardo, J. (2008). Implicaciones urbanísticas de la restauración de ríos. La planificación de espacios fluviales. En: Jesús del Olmo Alonso (Coord.), *El Derecho Urbanístico del Siglo XXI. Libro homenaje al profesor Martín Bassols*, Vol. 2, 251-264. Reus, Madrid.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE COSTE BENEFICIO PARA OBRAS ESTRUCTURALES EN LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN (P.G.R.I.)

Francisco J. Sánchez Martínez
Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica
fsmartinez@miteco.es,

Juan Antonio Hernando Cobeña
Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica
JAHernando@miteco.es

Mónica Aparicio Martín
Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico, Dirección General del Agua, Ministerio para la Transición Ecológica
MAparicio@miteco.es

Silvia Cordero Rubio
Departamento de Hidrología e Hidráulica de INCLAM
silvia.cordero@inclam.com

Miguel Aldea Pozas
Departamento de Hidrología e Hidráulica de INCLAM
miguel.aldea@inclam.com

Elena Martínez Bravo
Departamento de Hidrología e Hidráulica de INCLAM
elena.martinez@inclam.com

RESUMEN

El objetivo principal del estudio es analizar distintas medidas estructurales incluidas en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) y Planes Hidrológicos de Cuenca, para hacer frente a las inundaciones e identificar la mejor alternativa que permita establecer un orden de prioridad entre ellas. Uno de los estudios que se ha realizado es el Análisis Coste Beneficio de las mismas a partir de los indicadores habituales (Ratio Beneficio/Coste, Valor Actualizado Neto, Tasa Interna de Retorno o Período de Recuperación de la Inversión). Para la estimación de los daños evitados se han generado las zonas inundables varios periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Se ha utilizado cartografía LiDAR (2x2) y modelos hidráulicos bidimensionales. Se han aplicado curvas calado-daño a distintos usos y se han considerado los costes indirectos y de emergencia. El valor de la obra incluye el presupuesto de construcción, estudios, explotación y mantenimiento, expropiaciones y reposición de elementos según su vida útil. A la vista de los resultados, aunque no es el único análisis necesario, el coste/beneficio resulta indispensable para saber dónde hay que invertir. Además del análisis de rentabilidad se ha aplicado el protocolo de evaluación de la calidad hidromorfológica de las masas de

agua y cauces afectados, antes y después de las obras, se ha analizado la afección de las obras a las masas de agua y el cumplimiento de sus objetivos ambientales, se evaluado la demanda de la obra, la aceptación social, la disponibilidad de terrenos para ejecutar la obra y la tramitación ambiental que necesitaría el proyecto de la obra según la legislación actual.

1. INTRODUCCIÓN

La Subdirección General de Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, está elaborando desde hace 2 años "Los estudios coste beneficio, viabilidad y priorización de las obras estructurales incluidas en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) y Planes Hidrológicos de Cuenca".

El contenido esencial de cada PGRI es el programa de medidas, el cual está orientado, como se recoge en el artículo 11.5 del Real Decreto 903/2010, a lograr los objetivos de la gestión del riesgo de inundación para cada zona identificada partiendo de los principios generales de solidaridad, coordinación entre las distintas Administraciones Públicas e instituciones implicadas, coordinación con otras políticas sectoriales (ordenación del territorio, protección civil, agricultura, forestal, minas, urbanismo o medio ambiente), respeto al medio ambiente, y el planteamiento estratégico con criterios de sostenibilidad a largo plazo.

De todas las medidas posibles, aquellas clasificadas como Medidas estructurales deben disponer de los estudios coste-beneficio que las justifican, cumpliendo así con el artículo 46.5 del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de aguas y con el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, Anexo, Parte A.

La inversión en infraestructuras y medidas relacionadas con los recursos hídricos y la gestión de riesgos ambientales, como las inundaciones, requieren una programación de costes asociados, fuentes de financiación y criterios de recuperación de inversiones hacía un desarrollo sostenible y seguro, puesto que desencadenan efectos políticos, sociales y ambientales en el territorio. Es importante justificar adecuadamente cualquier inversión, no solo desde el punto de vista de la rentabilidad sino hacia el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. La Comisión Europea ha destacado que las diez prioridades políticas de UE contribuyen a la aplicación de la Agenda 2030 y que la UE alcanzará dichos objetivos

Actualmente la Comisión Europea ha sido crítica con las actuaciones estructurales de los planes españoles en cuanto a la justificación de la viabilidad, el cumplimiento de los objetivos ambientales de las masas de agua afectadas fijados en los planes hidrológicos y la aplicación de los artículos 4.1. y 4.7. de la Directiva Marco del Agua y otros puntos de aplicación del artículo 4. Objetivos ambientales. El trabajo completo incluye el análisis social y ambiental de las obras.

Una primera revisión de la documentación de los Planes llevó a la identificación de 60 obras en los ámbitos de las Demarcaciones Hidrográficas del Cantábrico Occidental, Cantábrico Oriental, Ebro, Guadalquivir, Júcar, Segura y Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Estas obras corresponden a actuaciones estructurales tipo presa, encauzamiento, derivación y túnel, planificadas en entornos urbanos, cauces y llanuras de inundación. Se realizó un primer análisis multicriterio simplificado en el que se tuvo en consideración factores como la disponibilidad de proyecto, estado de la tramitación ambiental, grado de aceptación o rechazo social, disponibilidad de los terrenos, prioridad en la Demarcación, declaración de Obra de Interés General del Estado para la selección de 30 actuaciones para su análisis de detalle. En la actualidad se han estudiado las 30 primeras actuaciones y se espera estudiar 30 más durante los próximos 2 años.

El objetivo básico del trabajo es el análisis de viabilidad de las medidas estructurales seleccionadas, así como establecer una prioridad, por grupos, en su ejecución. Los objetivos parciales establecidos para el estudio completo son:

- la recopilación de antecedentes existentes sobre determinadas propuestas de obras estructurales;
- la realización de los estudios necesarios para evaluar su funcionalidad en materia de reducción del riesgo de inundación existente;
- la justificación clara, transmisible y técnicamente robusta de la elección de la solución final de cada actuación frente a las alternativas propuestas, identificando los problemas o impedimentos para llevar a cabo algunas de las actuaciones;
- el aseguramiento de la compatibilidad con los objetivos ambientales de los planes hidrológicos y análisis de la tramitación ambiental;
- un análisis de la calidad hidromorfológica de los cauces afectados, actualizado según el Protocolo de Caracterización Hidromorfológica de masas de agua categoría ríos y su correspondiente evaluación del cumplimiento de los objetivos ambientales de las masas de agua afectadas, así como la justificación de las posibles exenciones (aplicación del art. 4 de la DMA, en general y del 4.7. en particular) e identificación de acciones de mejora de la calidad hidromorfológica tras la ejecución de las medidas;
- la identificación de las principales afecciones ambientales y el tipo de tramitación ambiental necesaria para cada proyecto según la legislación vigente, nacional y autonómica
- el estudio de la disponibilidad de terrenos, la demanda y la aceptación social,
- la identificación del ámbito competencial,
- y un estudio multicriterio con indicadores obtenidos de todos los objetivos anteriores que justifique la viabilidad y priorización de las 30 actuaciones.

Este último punto se encuentra actualmente en desarrollo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

De los PGRI y los Planes Hidrológicos, se ha recogido como información de partida los datos existentes en cuanto a la caracterización de las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI) o masas de agua afectadas por cada actuación.
Respecto a la definición de las obras, la información base es totalmente heterogénea, no solo por la tipología de la actuación y sus consecuencias, sino por el alcance de la misma. Algunas de estas actuaciones tienen proyecto de construcción aprobado, estudio de impacto ambiental e incluso Declaración de Impacto Ambiental (DIA) y otras no disponen ni de estudio de viabilidad básico. Existen proyectos redactados hace 10 años, y actuaciones cuyo proyecto de construcción se está redactando actualmente. También se ha detectado un gran número de expedientes caducados en las distintas fases de tramitación ambiental y algunos que carecen incluso de un análisis de viabilidad integral (social, ambiental, económico, etc.).

Para la elaboración del análisis coste-beneficio de las obras se ha utilizado diversa bibliografía de referencia (Jiménez et al., 2018; Directorate-general for regional and urban policy, 2014; Middlesex University Flood Hazard Research Centre, 2014-2016; Servicio de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU), 1990; Gracia et al., 2010).

Existen diversos criterios de rentabilidad económica aplicados para el análisis coste-beneficio de inversiones, siendo los principales y más habituales el Valor Actualizado Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el ratio Beneficio/Coste (B/C) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

Estas herramientas son válidas para estimar cuál puede ser el retorno de la inversión a realizar pero, sobre todo, son válidas y útiles para comparar inversiones entre ellas y definir cuáles son las más adecuadas desde un punto de vista económico.

Para poder realizar una correcta comparación entre distintas actuaciones se ha intentado homogenizar la información realizándose nuevos estudios donde ha sido necesario.

Estos nuevos estudios constan de 3 fases principalmente:

- Análisis de peligrosidad y riesgo utilizando:
  - Modelos digitales del terreno, con edificios, obtenidos a partir de la cartografía LiDAR, datos del PNOA del último vuelo disponible, facilitados por el IGN. Los MDT (2x2) han sido corregidos según datos de campo, ortofotografías, etc. En el caso de disponer de dicha cartografía actualizada gracias a los trabajos del 2º ciclo de planificación de la gestión del riesgo de inundación se ha trabajado con ésta. En los escenarios con actuación el MDT se ha modificado según los datos disponibles.
  - Ráster de rugosidades obtenida a partir del SIOSE
  - Datos de las obras de fábrica.
  - Modelos hidráulicos bidimensionales (volúmenes finitos), en un caso con el modelo hidrológico acoplado y varios anidados o solapados. En algunos casos muy concretos no ha sido necesario volver a pasar los modelos. Estos casos suponen un 5% del total. Los modelos han sido contrastados con los resultados de los proyectos y las actuales zonas inundables disponibles en el visor del SNCZI. Algunos modelos han podido ser calibrados gracias a imágenes de eventos recientes.
  - Cobertura de usos del suelo elaborada a partir del catastro, BTN, SIGPAC y ortofotografía aérea.
  - Puntos de especial importancia, identificados en el primer ciclo de planificación y actualizados mediante ortofotografías aéreas.
- Definición de las obras que incluyen la medida. En estos casos los datos de partida han sido los proyectos y estudios existentes, aunque en ocasiones se han hecho modificaciones. En los casos en los que las obras no se encuentran definidas, estas se han planteado y estudiado varias alternativas con el alcance de un estudio de viabilidad básico.
- Costes de inversión y mantenimiento. Para el cálculo de los costes asociados a cada obra se ha partido de la documentación existente en los proyectos de construcción, anteproyectos, estudios de viabilidad o se ha realizado un cálculo del presupuesto de la obra con alcance de estudio de viabilidad, ex profeso para este estudio. Además, se ha revisado que el conjunto de los mismos sea coherente en orden de magnitud y que todos contengan los costes generales que debe incluir un proyecto. Asimismo, se han considerado todos los costes incluidos en las recomendaciones de la documentación básica (Jiménez, A. et al, 2018 y García Cantón, A, 2012). Se han añadido los costes de explotación, de mantenimiento y de análisis de seguridad según las obras.

Se ha definido como año común de referencia el año 2018 (año 0), considerando que es el momento de puesta en marcha de todas las actuaciones. Así, los presupuestos de las obras incluidas en proyectos cuya redacción fue anterior a 2018 han sido actualizados a dicho año utilizando un coeficiente de actualización del 3.5%, revisándose también los valores de Beneficio Industrial, Gastos Generales e Impuesto sobre el Valor Añadido. Los costes y los beneficios se han calculado para un periodo de 100 años, como horizonte de la vida útil de la obra.

Para realizar este análisis, además, es necesario establecer:

- El ámbito geográfico afectado: zona inundable vinculada a ARPSI del primer ciclo. Depende de las características de la actuación (presa, encauzamiento, interceptor, etc.).

- El periodo a lo largo del cual se analiza el flujo de costes y beneficios del proyecto. Este periodo será la suma del periodo de construcción (según el proyecto, en caso de existir, o en base a proyectos de obras de tipología y alcance similar) y el periodo de explotación, que será de 100 años para poder comparar actuaciones de grandes obras civiles con actuaciones de menor entidad (incluyendo los costes de reposición y/o reconstrucción).

Los costes se dividen básicamente en periódicos y en no periódicos:

- Costes no periódicos: costes de redacción de proyecto, ejecución de las obras, tramitación ambiental, expropiaciones y control y vigilancia de la obra.
- Costes periódicos: costes de explotación y mantenimiento, revisiones de seguridad, reposición de equipos electromecánicos y reconstrucción de obras menores por agotamiento de la vida útil. Todos ellos se incluyen durante el periodo de análisis, teniendo en cuenta su marco temporal, como los de mantenimiento que tienen carácter anual y otros como las revisiones de seguridad que dependen de la legislación vigente.

Para la determinación de los beneficios, entendidos como daños evitados, se ha partido de varias fuentes de información geográficas tales como el catastro, SIGPAC, BTN, Google, etc., con las que se ha generado una capa de polígonos que representan usos del suelo de forma organizada y clasificada acorde con el territorio cuyos daños se han de valorar. Se han considerado los daños directos de uso: residencial, garajes, sótanos, comercial, industrial, dotacional, obras civiles, agrarios, ganaderos, caminos, calzadas urbanas, carreteras, ferrocarriles y vehículos. El valor de los daños se establece a partir del valor máximo de cada polígono y de la curva calado-daños estimada para cada uso.

En este trabajo se ha podido utilizar el valor catastral para los elementos del ámbito urbano construidos. Para las parcelas agrícolas, carreteras, etc. se ha utilizado un valor máximo obtenido de la bibliografía existente o calculado a partir de estudios y proyectos. Las curvas de calado – daño y el valor de contenido aplicados a cada uso se han obtenido de la documentación de referencia (Jiménez, A. et al, 2018, FEMA, 2018, Huizinga, J. et al, 2017, Agüero, E. et al, 2017, CHJ, 2013, Gracia, A. et al, 2010). No se ha considerado daños directos personales.

Los daños totales han sido estimados por el sumatorio de daños directos e indirectos:

- Daños directos:
  - Residenciales, comerciales, dotacionales, industriales, obras civiles
    - Fuente valor máximo: valor catastro protegido.
    - Fuente valor máximo alternativa: propuesta de precios medios por uso
    - Garajes, sótanos, plantas superiores a la baja (h distinta en urbano que en industrial)
  - Agrarios, caminos y calzadas urbanas
    - Fuente valor máximo: SIGPAC (Precios medios por uso)
  - Ganadería: no se ha considerado
  - Carreteras y ferrocarriles
    - Fuente valor máximo: BTN (Precios medios por uso)
  - Limpieza de viales
    - Fuente valor máximo: Estudio de Marina Alta (CHJ, 2013)
  - Vehículos
    - Fuente valor máximo: Estudio de Marina Alta (CHJ, 2013)
  - Puntos singulares
    - Identificación de puntos singulares dentro de la actuación (y dentro de referencia catastral)
    - Incremento del valor total en un 200%

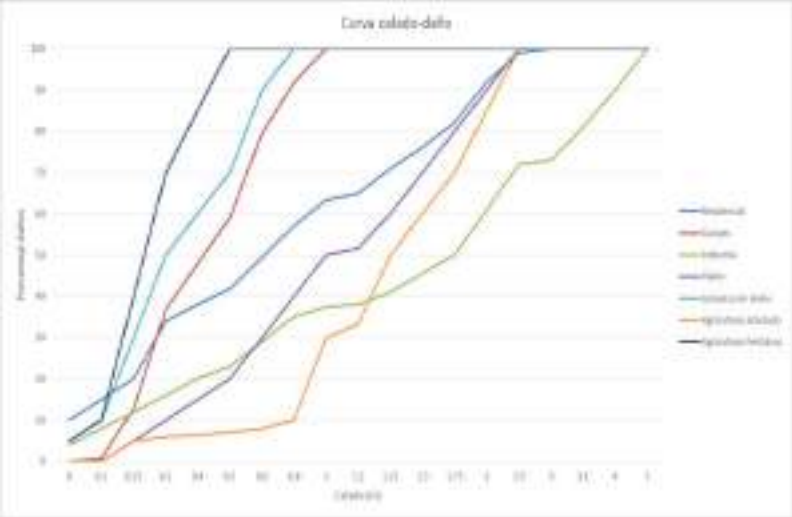


Figura 1. Curvas calado-%daños. Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

- Daños indirectos:
  - Residencial (15%)/Anexos (5%). Se considera: limpieza, realojamiento poblaciones e interrupción de servicios públicos.
  - Dotacional (10%). Se considera: limpieza e interrupción de servicios públicos.
  - Industria (55%). Se considera: limpieza e interrupción negocio.
  - Terciaria (35%). Se considera: limpieza e interrupción negocio.
  - Infraestructuras (25%). Se considera: limpieza, interrupción rutas transporte e interrupción comunicaciones.
  - Agraria (10%). Se considera: limpieza, interrupción producción, proliferación de plagas, limpieza, coste no interrupción de funciones y desplazamiento de personal/material.
  - Especial 2º orden (50%). Se considera: limpieza e interrupción de funciones.

No se suele considerar la pérdida de servicio si se realiza el análisis a nivel de país, pero se ha optado por utilizar los valores propuestos en la documentación de referencia (Jiménez et al., 2018; PLANINPA, 2010; Grigg et al., 1975). Estos valores están definidos como porcentajes del daño producido porque se supone que se está analizando el valor regional de los mismos. Adicionalmente, se han estudiado tipologías de construcción donde es necesario aplicar un coeficiente distinto al estándar, tanto por su tipología de construcción, como por su importancia social o ambiental (servicios esenciales, infraestructuras básicas y otros). No se consideran los daños intangibles, pero sí el 1% de coste que supone el trabajo específico de la emergencia (dato contrastado con el gasto producido en la Región de Murcia durante el episodio de avenida de San Wenceslao (Secretaría General de Protección Civil de Murcia, 2012).

Conocida la naturaleza probabilística de un suceso hidrológico y los daños que se ocasionarían en el caso de que se produjera (Chow et al., 1994), se calcula el coste anual de daños esperado por avenidas mediante la siguiente fórmula:

$$D = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{D(x_{i-1}) + D(x_i)}{2} [\mathrm{P}(x \geq x_{i-1}) - \mathrm{P}(x \geq x_i)]$$

Donde D(x) es el coste del daño anual medio que resultaría de ese evento x y P(x) es la probabilidad de que un evento de magnitud x ocurra en un año dado, es decir, la inversa del periodo de retorno.

Respecto al valor inicial de probabilidad se ha supuesto que los daños se producen a partir de la avenida de 5 años de periodo de retorno.

Para obtener los daños se ha programado una aplicación que lee el dato de calado en las calles y superficies libres de edificación, ya que el modelo hidráulico considera los edificios dentro de la malla de cálculo. A los polígonos en "superficie" les asigna el calado medio en ellos y a los polígonos que representan los edificios, el calado medio de las calles circundantes. Con este dato se calcula el daño producido por la inundación aplicado las curvas calado daño según la clasificación del uso del polígono, planta, etc. En el caso de uso residencial se ha considerado que la altura de la planta baja es de 3,25 m, mientras que en uso industrial es de 6,00 m. Además, se aplican los coeficientes correspondientes a los usos indirectos. En caso de estar identificado como punto de especial importancia también aplica el coeficiente correspondiente. El mismo programa informático genera las coberturas GIS con los valores de daños de cada polígono. Se genera una cobertura por periodo de retorno analizado (10-25, 100, 250-500 años) con el valor del daño acumulado por polígono y el valor del daño/m^2 por polígono.

Los valores económicos de los daños han sido contrastados con datos reales del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS, MAPAMA, 2016), e informes realizados sobre el análisis de daños provocados por inundaciones (Secretaría General de Protección Civil de Murcia, 2012, REDIAM, Junta de Andalucía, 2016). En particular se han analizados los eventos de la inundación de Bilbao en 1983, la del Júcar de 1982 y 1987, la del Genil en 2010, la del Cantábrico en 2010, la de SanWenceslado en 2012 y la Riada Santa María, 2019, en el Segura.

Los beneficios se calculan como la resta de los daños en situación actual menos los daños que se producirían con las alternativas estructurales futuras construidas. El valor del beneficio anual esperado medio es el que se utiliza para el cálculo de los indicadores financieros (VAN, TIR, PRI, B/C). De la aplicación de estos indicadores se obtiene la alternativa más rentable considerando su eficacia en la reducción del riesgo.

Finalmente se ha realizado un análisis de sensibilidad en el que se incluye un estudio de comparación de cómo evolucionan los criterios de rentabilidad ante variaciones en los datos iniciales utilizados, de forma que se pueda observar la volatilidad/robustez de los resultados de cada alternativa. En concreto se ha analizado:

- La evolución del VAN en función de la tasa de descuento, costes de inversión, costes de mantenimiento y explotación, beneficio anual,
- la evolución del ratio beneficio/coste en función de la tasa de descuento, costes de inversión, costes de mantenimiento y explotación, beneficio anual,
- la evolución del PRI en función de la tasa de descuento, costes de inversión, costes de mantenimiento y explotación, beneficio anual,
- la evolución del TIR en función de los costes de inversión costes de mantenimiento y explotación, beneficio anual.

En cuanto al análisis medioambiental se ha realizado desde 2 enfoques distintos:

- Valoración para el cumplimiento de los planes hidrológicos, en situación actual y con obra ejecutada, según:
  - la aplicación del "Protocolo de caracterización hidromorfológica de masas de agua de la categoría ríos" para la evaluación de la calidad hidromorfológica de los cauces, (https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/protocolo-caracterizacion-hmf-abril-2019_tcm30-496596.pdf)

  - la afección a los distintos indicadores de calidad de las masas de agua superficiales y subterránea,
  - la consecución de los objetivos ambientales tras la ejecución de las obras.
  - la necesidad de acogerse al artículo 4.7. de la Directiva Marco del Agua.
- Análisis de la tramitación ambiental, según:
  - la identificación de afecciones a la Red Natura 2000, a Espacios Naturales Protegidos, a Vías Pecuarias, a BIC y a hábitats de interés comunitario,
  - el análisis de la tramitación ambiental iniciada y no acabada o caducada, según la legislación en el momento de iniciar esa tramitación,
  - tipo de procedimiento de la tramitación ambiental según la actual legislación vigente, nacional y autonómica.

En cuanto al análisis de la viabilidad social, también se ha realizado desde varios enfoques, según:

- Grado de demanda de la obra estimado con la información obtenida de publicaciones, solicitud de la obra al Ministerio, preguntas parlamentarias, etc.
- Grado de aceptación de la obra estimado según una encuesta realizada a los agentes sociales, administrativos, medioambientales, etc. representativos ligados a la obra.
- Disponibilidad de terrenos, calculado a partir de la superficie a expropiar, su titularidad y su clasificación de suelo según el Plan General de Ordenación Urbana del término municipal en el que se ubique la obra.

A estos análisis se añade:

- Análisis del ámbito competencial.
- Análisis de los indicadores de peligrosidad y riesgo de inundación según criterios empleados en los PGRI más otros complementarios.
- Análisis del impacto de las obras en los objetivos de desarrollo sostenible, identificando los indicadores en los que la obra introduce un cambio.
- Análisis del impacto del cambio climáticos según:
  - Por una aproximación en el posible cambio de caudales punta en el periodo 2041-2070, según los escenarios RPC 4.5 y 8.5. aplicando un método sencillo como es la fórmula del método racional
  - Por una aproximación cualitativa de los efectos del Cambio Climático en el riesgo de inundación analizando varios factores que intervienen en la formación de escorrentía.

  En ambas propuestas se ha utilizado la información disponible de MITERD (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), documentación encontrada en proyectos y plataformas asociadas a MITERD como AdapteCCa (Plataforma de intercambio y consulta de información sobre adaptación de Cambio Climático en España, https://www.adaptecca.es/). Se ha consultado además información de las Confederaciones Hidrográficas donde se encuentra localizada la actuación, así como la Evaluación preliminar de los Riesgos de Inundación (EPRI)

Los resultados de los indicadores financieros junto con otros relacionados con la seguridad de la obra, el grado de afección a la masa de agua o cauce a partir de la aplicación del protocolo HMF, el tipo de tramitación ambiental, la disponibilidad de terrenos para ejecutar la obra o la aceptación social, etc., se utilizarán en el cálculo de un análisis global que permita clasificar las actuaciones en grupos e identificar las más ventajosas.

3. RESULTADOS

Hasta el momento se han evaluado 30 actuaciones, realizado 89 modelos hidráulicos definitivos, 30 corresponden a la situación actual y el resto a alternativas de las distintas actuaciones. Se han tratado más de 154.000 ha de cartografía y más de 792 Km de cauce. Cada uno de estos escenarios se ha corrido para simular los caudales de 10, 100 y 500, salvo en algunos modelos donde fue necesario otro periodo de retorno para las frecuencias altas o bajas. En el caso de 4 presas, donde la pérdida de capacidad del embalse, en 100 años, es significativo, ha sido necesario utilizar, o calcular, los caudales laminados por la obra en el año 0 de su puesta en carga y en el año 100.

Se ha intentado ir al máximo detalle posible. Esto ha llevado consigo tiempos de cálculo de hasta 15/20 días. La complejidad de los modelos se refleja por ejemplo en el número de puentes/obras de drenaje, el número de celdas y el número de hidrogramas de entrada definidos en los modelos.

En el caso de celdas, el modelo con mayor número contiene 3.841.573 triángulos. En total se han considerado 792 hidrogramas de entrada. El modelo con mayor número de hidrogramas de entrada contiene 26. En cuanto a las obras de fábrica y puentes, se han simulado más de 556 puentes y 54 tramos soterrados. El modelo con mayor número de puentes suma 88 y un tramo cubierto. Este modelo además consta de 9 hidrogramas de entrada y se modelizó acoplado con lluvia.



Figura 2. Imagen de identificación de estructuras e hidrogramas de entrada en modelo hidráulico. Fuente: elaboración propia.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de la calibración de uno de los modelos hidráulicos:



Figura 3. Calibración de calados de una zona inundable, avenida de 2012. Calados en el modelo: aproximadamente 1m.

Una vez terminada la modelización hidráulica, se han generado los ráster de zonas inundables (niveles, velocidades y calados).



Figura 4. Porcentaje de reducción de la zona de alta peligrosidad con obra respecto del estado actual. Fuente: elaboración propia.

Asociado al ámbito de los modelos, se han preparado capas de usos de suelo de gran tamaño, algunas de ellas constan de más de 90.000 regiones. Cada región está asociada a una parcela catastral, de SIGPAC o vía de transporte. Cuando el nº de regiones suma más de 40.000, se ha tenido que subdividir el ámbito en 3 zonas para poder manejar la cantidad de información generada a nivel parcelario. A esto hay que añadir la identificación de los puntos de especial importancia dentro de cada actuación, ya que se ha considerado una valoración de daños distinta. Es total, ascienden a 798 puntos identificados. Algunos ámbitos tienen ubicados de más de 50 elementos georreferenciados. Este trabajo se ha realizado en coordinación con la primera revisión de los mapas de riesgo, según el RD 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

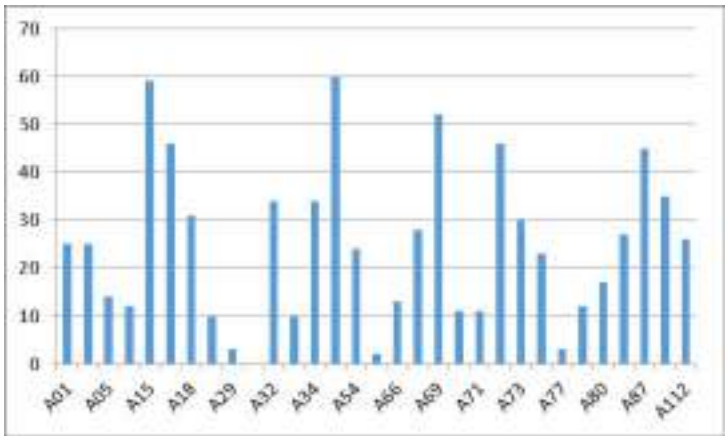


Figura 5. Número de puntos de especial importancia por actuación. Fuente: elaboración propia.

Toda esta información se ha incluido dentro de bases de datos asociadas a cada periodo de retorno de cada una de las alternativas planteadas en cada actuación, en las que se han generado registros que van desde los 2.500 en modelos pequeños a 70.000 en los modelos de mayor envergadura. En total, las bases con el parcelario y los daños asignados ascienden a 312 bases de datos y más de 8 millones de cruces de registros catastrales con zonas inundables.

En la siguiente imagen se puede ver el detalle de la definición de las parcelas y su parecido a la realidad, con la conexión en los límites de la capa, y la densidad de puntos singulares que pueden tener áreas de núcleos urbanos de gran tamaño. La imagen muestra un detalle de dicha georreferenciación ya que esta debe ser exacta para que el programa de cálculo de daños pueda valorar adecuadamente la parcela.



Figura 6. Detalle de casco urbano antiguo dentro del área de capa de usos de suelo con puntos singulares identificados. Fuente: elaboración propia.

Una vez cruzados los datos de los resultados obtenidos de la modelización hidráulica y de las capas de usos del suelo (catastro, SIGPAC, BTN, etc.), se han obtenido los valores para cada polígono de usos, por alternativa y periodo de retorno de cada una de las actuaciones analizadas hasta la fecha. Con los valores acumulados se obtiene el valor del daño. Además se han generado 2 tipos de planos (por alternativa y periodo de retorno): el que muestra las parcelas con el valor acumulado dentro de un rango y el que muestra el valor/m^2. Ambas representaciones resultan básicas para el control de errores y para la identificación de zonas críticas.

La siguiente figura muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos de una de las zonas estudiadas.

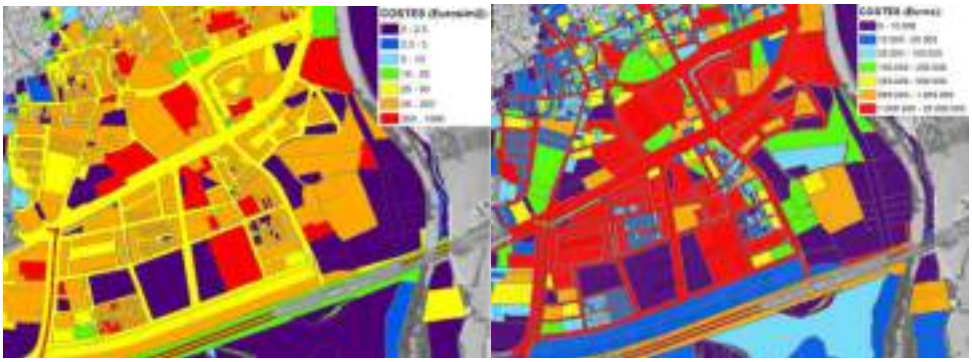


Figura 7. Detalle de casco urbano dentro de la zona de cálculo de daños, en función de su valor (€/m^2 y €). Fuente: elaboración propia.

Para contrastar todos los valores se han analizado los datos del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) de indemnizaciones por inundación (que incluye siniestros causados por lluvia in situ), por usos. Aunque el valor total no es comparable con el obtenido en el análisis de daños ya que únicamente se disponen de 12 años de datos e incluyen daños por lluvia, en algunos ámbitos, en los que sí han ocurrido importantes sucesos que han permitido algún contraste puntual o en la distribución de daños por usos del suelo. No obstante se ha realizado el ejercicio comparativo en todos los ámbitos.



Figura 8. Comparativa del reparto de las indemnizaciones realizadas por el CCS (2012) y los daños para Alternativa 0 y un periodo de retorno de 10 años en función del uso del bien afectado dentro del ámbito de la actuación. Fuente: elaboración propia.

Ciertos ámbitos muy expuestos a las inundaciones cuentan con un alto grado de protección. Alguno de ellos se ha identificado gracias a visitas de campo y otros gracias a los visores de mapas con fotografías de las calles. Los datos del CCS también resultan muy útiles en estos casos ya que se pueden identificar zonas, donde que han sufrido eventos de gran magnitud, cuyos presupuestos de las indemnizaciones concedidas por el CCS no son tan altos como cabía esperar al compararlos con otros de características similares. En estos casos no es posible cuantificar pero sí detectar anomalías. Las zonas de autoprotección han sido identificadas calle a calle, analizando muros, terraplenes, puertas permeables, etc., bajando así el valor de los daños en dichas zonas.

Los costes se han calculado a 100 años para todas las alternativas. Los resultados de algunas de ellas en explotación y mantenimiento son muy altos.

En la siguiente imagen se pueden observar los resultados de este análisis de rentabilidad únicamente de la alternativa mejor.

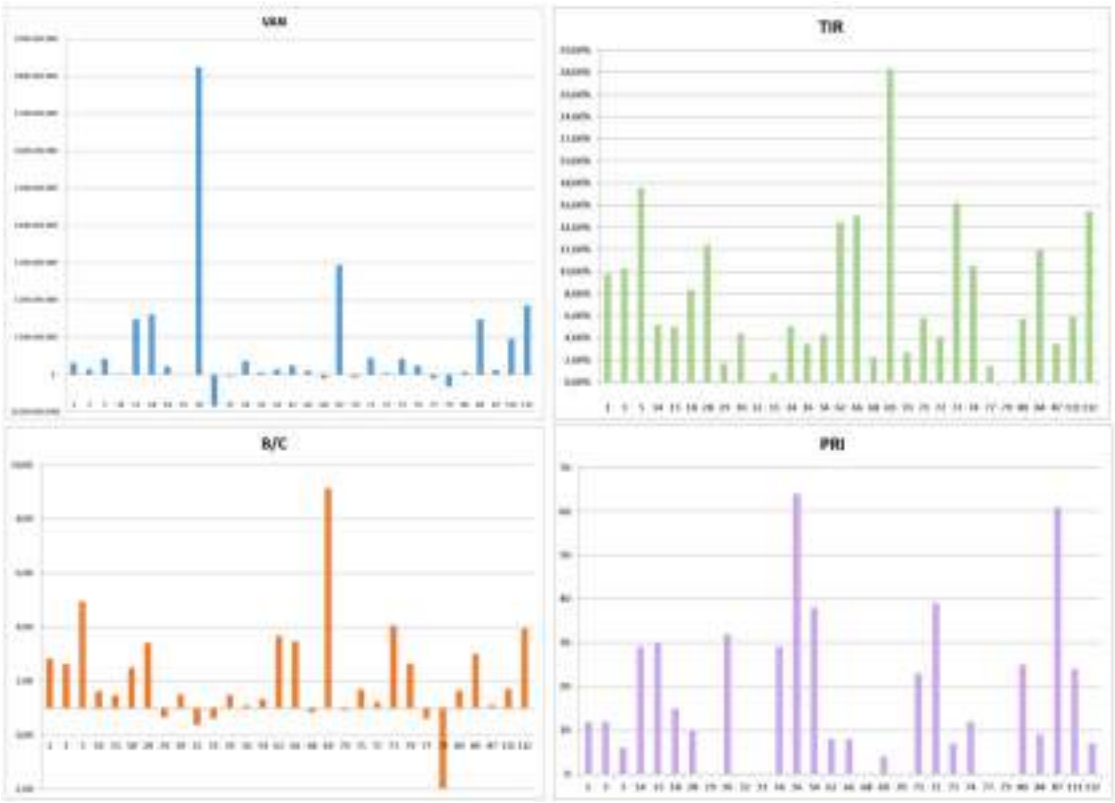
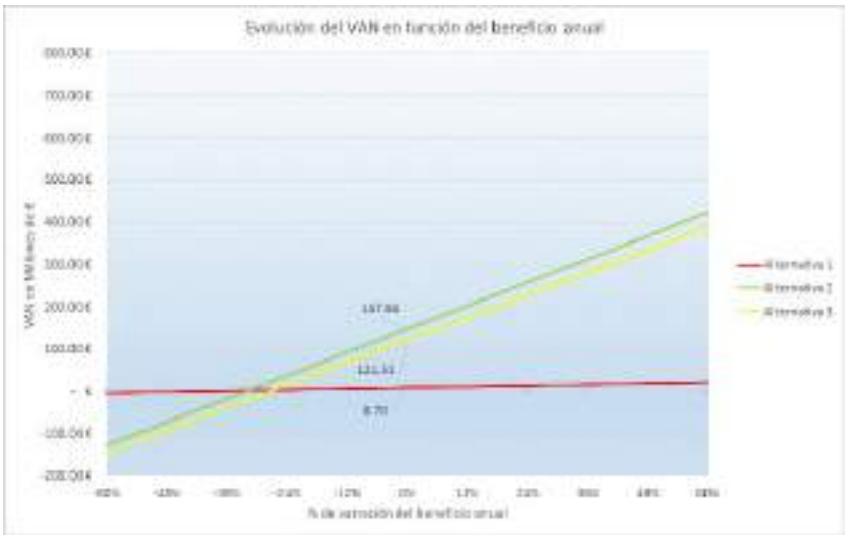


Figura 9. Resultados de los indicadores de rentabilidad. Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en los resultados, no todas al actuaciones son rentable (si el VAN es negativo, el TRI <0, el B/C <1 o el PRI <0. De las 30, 7 han resultado ser no rentables.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, los datos de inicio son muy variados, por lo que el nivel de incertidumbre de estos resultados es importante. Para poder analizar el efecto que produce un error en alguno de los factores principales analizados (daños, costes de inversión, costes de mantenimiento o tasa de descuento) se ha realizado un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos, de forma que sea posible valorar entre dos alternativas o entre 2 actuaciones de resultados económicos similares cual es mejor en base a la consistencia de los resultados. La siguiente imagen muestra el análisis de sensibilidad para 2 actuaciones con VAN similar:



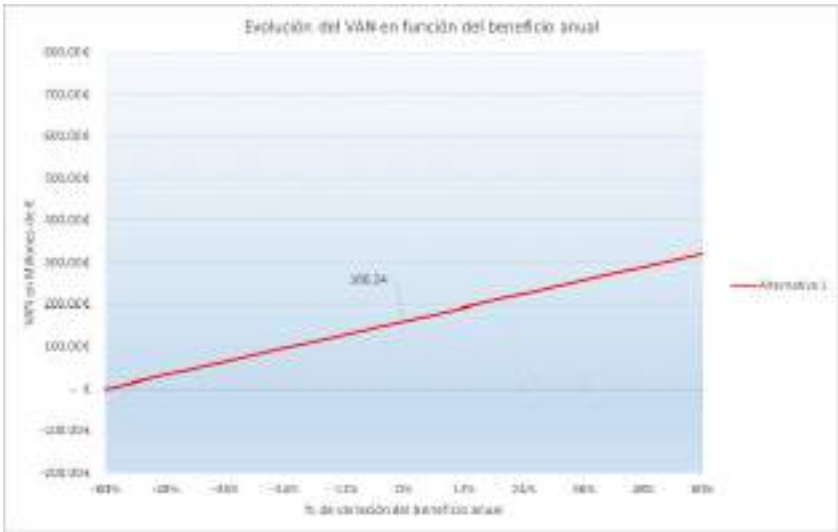


Figura 10. Comparativa evolución VAN en función del beneficio anual, para 3 alternativas de una actuación (arriba) y una única alternativa de otra (abajo). Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver, la pendiente de la 2ª actuación es más tendida que la alternativa 2 de la 1ª actuación, por lo que su variabilidad ante posibles errores es menor. Además el error necesario en el cálculo de daños para el que dejaría de ser rentable la actuación es superior a la alternativa 2 de la 1ª actuación. Este factor se podría tener en cuenta en el futuro análisis multicriterio. Un 19% de las actuaciones cambiaría su rentabilidad si se hubiera cometido un error del 30% en algunos de los parámetros o variables considerados,
Los daños en zona urbana y los edificios de las zonas rústicas han sido calculados mediante el valor catastral. En algunas actuaciones no se ha podido disponer de este valor y se han empleado valores medios. Comparando los resultados en una ciudad y un pueblo pequeño, se ha comprobado que en las ciudades, los resultados con valores medios son más bajos y en zonas rurales más altos, pero no superan el 20% de error.

En cuanto al análisis medioambiental los resultados, de la aplicación de protocolo de caracterización hidromorfológica de masas de agua de la categoría ríos y la valoración de la afección a las masas de agua y cauces, son los siguientes:

Calidad hidromorfológica, comparación con el estado actual			Estado global con obra, respecto al estado actual		
Afecta	12	39%	Afecta	10	15%
No Afecta	11	35%	No Afecta	50	75%
Mejora	8	26%	Mejora	7	10%
Total cauces estudiados	31	100%	Total cauces estudiados	67	100%

Tabla 1. Resumen de resultados del impacto de las obras en la calidad ambiental. Fuente: elaboración propia.

En cuanto al procedimiento para la tramitación ambiental del proyecto, el resumen de los resultados es el siguiente:

Tipo de procedimiento de tramitación ambiental		
Ordinaria	4	13%
Simplicada	23	77%
No sujeta a EIA	3	10%
Total	30	100%

Tabla 2. Resumen de resultados del tipo de procedimiento de tramitación ambiental. Fuente: elaboración propia.

En cuanto al análisis de la viabilidad social, tras analizar 736 documentos y realizar 288 encuestas tras comunicarse con 710 personas se ha obtenido que 26 de las obras son demandadas, en 3 hay división de opiniones y de una de ellas no se ha obtenido información. En cuanto a la aceptación social, la mayoría son positivas, salvo aquellas que producen rechazo por parte de los grupos medioambientales, principalmente, aunque en una obra hay oposición de los vecinos y en otra la oposición se encuentra en un sector económico.

El volumen de población afectada varía mucho respecto de la obra. El siguiente gráfico muestra los resultados de la población potencialmente afectada, para una inundación correspondiente al periodo de retorno de 500 años, antes y después de contruir la obra de defensa frente a avenidas:



Figura 11. Población afectada con y sin obra (Q500). Fuente: elaboración propia

Por último, sobre la disponibilidad de terrenos es necesario expropiar salvo en una actuación y 2 donde toda la titularidad de los terrenos ocupados temporal o permanentemente por la obra.

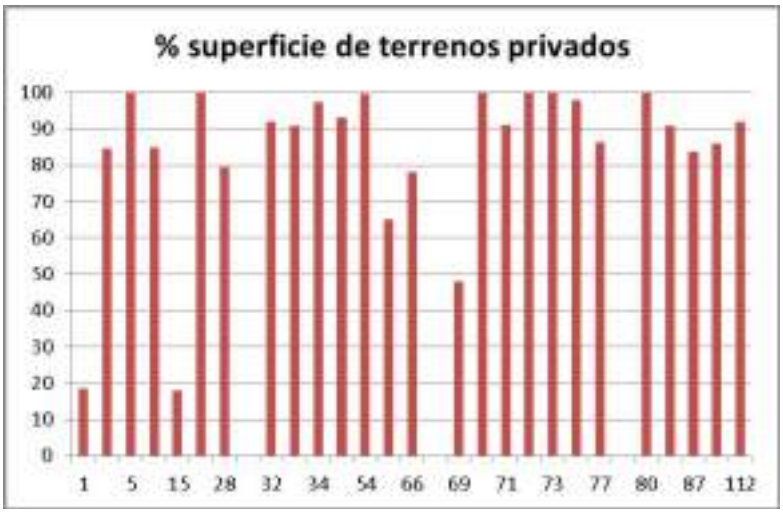


Figura 12. Porcentaje de suelo de titularidad privada que ocupa temporal o permanentemente cada obra. Fuente: elaboración propia

En cuanto al posible cambio de caudales punta en el periodo 2041-2070, según los escenarios RPC 4.5 y 8.5. aplicando un método sencillo como es la fórmula del método racional, se prevé un incremento del 20% del caudal punta y una variación máxima del 50%. Según la aproximación cualitativa de los efectos del Cambio Climático en el riesgo de inundación analizando varios factores que intervienen en la formación de escorrentía, en cualquiera de los escenarios, en el 60% de los ámbitos estudiados el impacto del Cambio Climático en inundaciones se considera significativo.

5. CONCLUSIONES

Gracias a los PGRI y los Planes Hidrológicos, la información de partida de cada actuación es relativamente homogénea respecto a la caracterización hidrológica, hidráulica, territorial y ambiental. Sin embargo, la documentación relativa a la definición de las obras es totalmente heterogénea, como ya se ha comentado, no solo por la tipología de la actuación y sus consecuencias, sino por el alcance de la misma. Los planes actuales recogen la herencia de otras planificaciones en los que se van sucediendo cambios de criterio ligados a cambios en la sociedad y, en consecuencia, en la legislación. La heterogeneidad de la información de partida es un punto débil en la robustez del análisis.

El análisis inicial de los datos existentes derivó en la necesidad de buscar un método que disminuyera las diferencias de información entre unas actuaciones y otras. En este sentido, con el objetivo de rebajar los errores que se introducen por emplear distinta cartografía o modelos hidráulicos, la primera fue actualizada, en todos los casos se utilizaron datos LiDAR 2x2 (PNOA), casi todos los ámbitos se volvieron a simular con el mismo modelo hidráulico bidimensional en situación actual y en el escenario con actuaciones.

Casi en su totalidad la información antecedente incluía las zonas inundables en estado actual según los mapas de peligrosidad que se pueden ver en visor del SNCZI ya que las actuaciones se ubican en ARPSIs (salvo el tipo presa). Respecto a los escenarios con las obras, en el caso de existir un proyecto de construcción de la misma, estudios de viabilidad o alternativas, salvo excepciones, solo se habría simulado el caudal de diseño de la obra.

Los caudales de diseño no siempre encajan con los estudios realizados para la elaboración de la cartografía de Zonas Inundables. Entendiendo que estos estudios encajaron los caudales para un número altísimo de kilómetros de cauce, se revisaron todos para conseguir una armonización de los mismos.

Este proceso ha llevado a revisar, durante este 2º ciclo, caudales en ciertas ARPSIs según los datos de los estudios hidrológicos de detalle. En otras ocasiones se ha analizado la obra con los caudales de las ARPSIs revisando el nivel de seguridad (periodo de retorno del caudal de diseño de la obra). En esos casos se necesitó construir el modelo que fue "calibrado" en situación actual con los modelos de precisión incluidos en los trabajos anexos a los PGRI.

El hecho de que en paralelo se estuvieran modelizando tramos de cauce en coordinación con los incluidos en el 2º ciclo, ha hecho que en algunos de los casos se pudiera asimilar el modelo preparado para las SNCZI, y en otras, los modelos realizados para este proyecto fueran incorporados al mismo.

En el caso de los modelos en los que se ha tenido en cuenta la lluvia, se ha podido ver que el efecto de los tejados y los patios interiores de los edificios a la hora de acumular y almacenar el agua es importante, ya que crea puntos con calados importantes que, si no se filtran, aumentarían el daño producido y por tanto el error cometido en el cálculo.

La autoprotección en ciertos ámbitos o el desconocimiento de las funciones de transferencia entre el calado fuera-dentro de un edificio hace que se sobrevaloren los daños. Por otro lado, el valor catastral a la baja o la no consideración de los daños personales hacen que se infravaloren. Para minimizar esta carencia de información ha sido básica la comparación de todos los datos estimados de daños por el CCS, las Confederaciones y los equipos de protección civil. Se ha conseguido centrar en orden de magnitud los resultados con las cifras de daños reales y con ello los resultados. Para el análisis comparativo entre alternativas y actuaciones es consistente para planificación o un estudio de viabilidad.

La definición de los costes asociados a cada una de las actuaciones es otro de los puntos complejos de este análisis, ya que se han intentado comparar costes procedentes de Proyectos de construcción, Anteproyectos, Estudios de viabilidad o actuaciones sin información previa, para las que se ha definido un presupuesto a nivel de planificación. Además, a la hora de para definir los costes de mantenimiento, hay una gran controversia, ya que no hay bases de datos con valores medios de costes de mantenimiento que se puedan utilizar y la teoría únicamente define que estos costes anuales se pueden asociar a un 1.2% de los costes de inversión, mientras que en la realidad el mantenimiento de los elementos estructurales es reducido o nulo. Esto aumenta la incertidumbre en la elaboración del análisis.

A la hora de poder relacionar los datos gráficos proporcionados por catastro, con las tablas datos disponibles (de libre acceso) y las tablas de datos protegidos, se han encontrado discordancias, como edificios públicos, por ejemplo colegios de educación primaria y secundaria, aparecen como suelo sin edificar o directamente no disponen de referencia catastral, con lo que ha sido necesario comprobar, al menos para los puntos singulares que por su importancia se considera necesario, que están incluidos en los datos de catastro de libre disposición. En los casos para los que estas parcelas no disponían de valor catastral oficial se han utilizado valores medios, de forma que se redujera el error por falta de información. Además, los datos de libre disposición disponen de referencias catastrales de 14 dígitos que no diferencian dentro de una misma parcela catastral, mientras que catastro sí dispone de 6 dígitos más, ubicados a continuación de los 14 conocidos, que separan cada subelemento dentro de esta parcela catastral. Por no disponer de esta información, es necesario hacer relaciones de referencias catastrales con datos tan diversos como planta, puerta o escalera, creando errores de relación que con la referencia de 20 dígitos se podrían resolver.

Además, en los casos de actuaciones ubicadas en comunidades con la competencia de registro catastral transferida, los datos de partida son diferentes, las referencias catastrales o las relaciones entre las capas vectoriales y las tablas de datos también, por lo que el trabajo de análisis y preparación de la información se complica.

A esto hay que añadir la resiliencia de la población. El conocimiento del riesgo reduce la vulnerabilidad. Esto implica que se haya trabajado en zonas un nivel de autoprotección alto, ya sea mediante la urbanización o edificación (edificios elevados respecto del nivel de la calle, pilotados, etc.) o mediante protecciones puntuales (barreras, compuertas, etc.), de forma que un cálculo de daños sin tener en cuenta este efecto en determinados lugares da resultados alejados de la realidad, mientras que en zonas con poca autoprotección los resultados obtenidos directamente sean sensiblemente parecidos a los registrados en sucesos históricos conocidos.

Para poder comparar y calibrar los resultados se han utilizado datos procedentes de registros del Consorcio de Compensación de Seguros entre los años 2005 y 2017. Cabe añadir a lo comentado en puntos anteriores que los datos del CCS dependen del grado de penetración del seguro, que es variable por regiones por lo que los daños reales aumentan en aquellas zonas con poca penetración.

Como consecuencias del trabajo y sus posibles aplicaciones prácticas, cabe destacar:

La consecuencia primaria y directa de este trabajo es la creación de una metodología que permita comparar actuaciones de diversas características y magnitudes, con información inicial asociada a distintas fases de desarrollo y ubicadas a todo lo largo del territorio español. Ya que, como resultado final del estudio, se propondrá un listado ordenado de actuaciones asociado a un análisis multicriterio que permitirá realizar las próximas inversiones, en el ámbito de la protección contra inundaciones, directamente en las actuaciones que sean mejores desde un punto de vista económico, social y medioambiental.

Al no ser las actuaciones homogéneas en el periodo de retorno que protegen, en la magnitud de los cauces que se analizan ni de los riesgos o daños asociados no es posible priorizar únicamente con la información económica, aunque ponen de manifiesto cuando los daños evitados o beneficio tienen un valor muy elevado a pesar de que los costes también lo sean. En las grandes actuaciones en ríos y ciudades importantes donde los costes de inversión son muy elevados la relación beneficio/coste puede ser similar al obtenido en una población pequeña, un río no principal y un coste de actuación mucho menor. El valor del VAN identifica claramente donde los beneficios son mayores. El valor del PRI también es un factor importante en el multicriterio.

Son esenciales los análisis de sensibilidad, ya que conociendo las incertidumbres de los costes y de los beneficios al calcular el rango en el que se mueven estos valores dentro de una “situación de rentabilidad” de una obra determinada. Para identificar la mejor de varias alternativas, estas incertidumbres pueden ser más o menos constantes entre las alternativas, pero al comparar entre distintas obras es importante captar las diferencias entre ellas. Por ejemplo, los costes de mantenimiento o los daños dentro de zonas donde existe la autoprotección. Para esto último, los datos del CCS han sido valiosos.

Cabe reseñar en estas conclusiones, que de este estudio se desprende una necesidad de actualización y revisión de toda la información catastral disponible, de forma que pueda ser utilizada correctamente por todos los agentes que así lo necesiten, así como un trabajo de unificación de las distintas comunidades con competencias transferidas, para que se consiga que la información catastral obtenida de distintos orígenes sea la misma y tenga formatos similares, que permitan facilitar su análisis y entendimiento.

Otro tema importante debido a la obligación por ley de este tipo de análisis para cualquier obra de defensa contra inundaciones es la de disponer de unas curvas calado-daño de uso nacional, así como una base de datos con valores medios por uso del suelo en euros. Tan importante como la metodología es el nivel de desagregación al que se calculen los daños y el valor máximo asignado a cada uso del suelo.

Por último, se pone en valor el ejercicio teórico-práctico, por su interés el ámbito del cálculo de daños a este nivel de detalle y aplicado en ámbitos muy diferentes. No sólo plantea una metodología de cálculo de daños válida basada en datos catastrales, sino que incluye una metodología para trabajar únicamente con los datos de libre disposición. En cuanto a los resultados de los indicadores económicos, sociales y ambientales, se llega a la conclusión de que son una herramienta básica a la hora de tomar decisiones, ya que permiten ordenar las obras por rentabilidad pura o con más carga en los beneficios, agrupar por tipo magnitud de la actuación y sobre todo planificar dependiendo de los recursos disponibles, por afección a las masas de agua, población a la que se reduce el nivel de riesgo, procedimiento de la tramitación ambiental, mayor o menor disponibilidad de terrenos, ámbito competencial, etc. El objetivo es clasificar las actuaciones en una serie de grupos, con características comunes, de tal forma que se identifiquen las obras que se pueden licitar, las que necesiten proyecto o completar su tramitación, las que necesiten otros estudios complementarios o bien desarrollar otras soluciones y aquellas que no son viables.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico por impulsar, redactar y financiar este proyecto, junto con las Confederaciones Hidrográficas y Organismos de Cuenca implicados. Así como también el profundo reconocimiento al resto del equipo redactor y a aquellas personas, instituciones y empresas que han aportado datos y conocimiento experto. Todas ellas suman más de 75 nombres siendo complicado citarlos en esta comunicación.

REFERENCIAS

- Agüero, E., Santos, R. y Stocker, C. (2017). *Metodología de cálculo de daños por inundaciones en la CAPV*. Agencia vasca del agua (URA), SENER, País Vasco, España.
- CCS, MAPAMA (2016). *Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones*. Madrid, España.
- CHJ (2013). *Plan de defensa contra las Avenidas*. Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia.
- Chow, V.T. et al. (1994). *Applied Hydrology*. USA.
- Comisión Europea. (2015). *Guide to Cost-Benefit Analysis of investment projects* (Economic appraisal for Cohesion Policy, 2014-2020). Directorate General Regional Policy. https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cba_guide_cohesion_policy.pdf
- FEMA (2018). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Hazus, MH Technical Manual*. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management. Washington, USA.
- García Cantón, A. (2012). *Guía Técnica para la caracterización de las actuaciones a considerar en planes hidrológicos y estudios de viabilidad*. Centro de Estudios Hidrográficos, Cedex, Madrid.
- Gracia, A. et al. (2010). Riesgos y cuantificación de daños por inundación. *5º Congresso Internacional Ordenamento do Território, Desarrollo Sostenible y Gestión de Recursos Hídricos*, 27-28 de octubre. Lisboa, Portugal.
- Grigg, N.S. y Helweg, O.J. (1975). *State-of-the-Art of Estimating Flood Damages in Urban Areas*. American Water Resources Bulletin, USA.
- Huizinga, J., de Moel, H. y Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions*. Joint Research Centre (JRC). European Commission
- Jiménez, A. y Hernández, A, (2018). *Guía metodológica para el análisis coste-beneficio de actuaciones estructurales de defensa frente a inundaciones* (Borrador). Centro de Estudios Hidrográficos, Cedex, Madrid.
- Middlesex University Flood Hazard Research Centre (2014-2016). *Marco común de características del Análisis Coste-Beneficio de la gestión de riesgos de inundación (Flood-*

CBA). Unidad de Protección Civil, Comisión Europea.

- PLANINPA (2010). *Plan Especial de protección civil ante el riesgo de inundaciones del Principado de Asturias*. Principado de Asturias.
- REDIAM, Junta de Andalucía (2016). *Task D "Implementation of Real Case Studies", Case studies: Écija. Training material*. Flood CBA2 Project, Sevilla.
- Secretaría General de Protección Civil de Murcia (2012*). Informe sobre el episodio de lluvias del 28 de septiembre de 2012. Análisis de causas y consecuencias. Estimación de daños*. Murcia.
- Servicio de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, MOPU (1990). *Recomendaciones para la evaluación económica, coste-beneficio de estudios y proyectos de carreteras*. Madrid.

ANÁLISIS DE LA PERCEPCIÓN SOCIAL PARA LA GESTIÓN Y COMUNICACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES

Juan Antonio García Martín
Facultad de Ciencias Sociales de Talavera de la Reina, Universidad de Castilla-La Mancha, España
juan.garcia@uclm.es
http://orcid.org/0000-0002-3693-6180

María Amérigo Cuervo-Arango
Facultad de Humanidades de Toledo, Universidad de Castilla-La Mancha, España
maria.amerigo@uclm.es
http://orcid.org/0000-0002-8831-9221

José María Bodoque del Pozo
Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica, Universidad de Castilla-La Mancha, España
josemaria.bodoque@uclm.es
https://orcid.org/0000-0002-7865-5141

Andrés Díez-Herrero
Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

Raquel Pérez-López
Facultad de Educación, Universidad Complutense de Madrid, España
rperezlopez@ucm.es
http://orcid.org/0000-0002-6019-5984

Fernando Talayero Sebastián
Facultad de Ciencias Sociales de Talavera de la Reina, Universidad de Castilla-La Mancha, España
fernando.talayero@uclm.es
https://orcid.org/0000-0002-9582-1252

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en presentar el potencial que el análisis de la percepción psicosocial tiene para el diseño de estrategias de gestión y comunicación del riesgo de inundaciones. Para ello, en primer lugar, se realiza una exposición teórica de los principales procesos psicológicos implicados en la evaluación del riesgo de inundación. A continuación se presentan dos estudios empíricos realizados, respectivamente, con la población residente en el municipio de Navaluenga (Ávila) y con distintos grupos de interés (*stakeholders*, en terminología anglosajona) en el tramo del río Duero entre Toro y Zamora. El primer estudio, partiendo de una encuesta a 254 residentes, expone cómo la evaluación de la percepción del riesgo de inundación y del grado de conocimiento de las acciones a desarrollar antes, durante y después de la misma es útil para el diseño de una estrategia de comunicación del riesgo de inundación. El segundo estudio se centra en explorar las discrepancias entre 28 grupos de interés en la eficacia percibida de distintas medidas de gestión del riesgo de

inundación como punto de partida para el diseño de un plan de comunicación que tenga en cuenta estas divergencias en sus percepciones e intereses.

1. INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales tienen un impacto inmediato en la vida humana y, a menudo, resultan en la destrucción del entorno físico, biológico y social de las personas afectadas, lo que también tiene consecuencias significativas en la calidad de vida de estas comunidades a largo plazo (Wisner y Adams 2002). Como se observa en la Figura 1, utilizando los datos a nivel mundial de la Emergency Events Database (EM-DAT), el Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED, 2019) reporta entre 2008 y 2018 que las inundaciones fueron el desastre natural más frecuente (suponiendo el 43,6% de los eventos asociados a los nueve tipos de desastres naturales considerados), el cuarto según el número de muertes (causando el 7,7% de las muertes confirmadas o probables), el que afectó a un mayor número de personas (37,2% de las personas heridas, sin hogar y afectadas) y el tercero en función de las pérdidas económicas ocasionadas (suponiendo el 21,3% de las pérdidas económicas relacionadas con desastres naturales). Adicionalmente, en el último reporte del CRED para 2019 se señala que las inundaciones registradas en la EM-DAT a nivel mundial durante este año: (1) fueron el desastre natural más frecuente y supusieron cerca del cincuenta por ciento de los eventos, muy por delante de las tormentas (23%); (2) causaron más del 40% de las muertes, bastante por encima de los fallecimientos como consecuencia de las temperaturas extremas (25%) y de las tormentas (21%); y (3) se situaron como el segundo tipo de desastre natural que afectó a más personas, ya que supusieron una tercera parte de las personas heridas, sin hogar y afectadas por desastres naturales, ligeramente por detrás de las tormentas que afectaron al 35% (CRED, 2020).

A los datos expuestos en el párrafo anterior, se debe añadir que las proyecciones futuras no son optimistas respecto al impacto de las inundaciones, ya que la intensificación de los eventos hidrometeorológicos extremos, como consecuencia del calentamiento global, y la creciente exposición de la población generan importantes inquietudes sobre la evolución del impacto de las inundaciones, tanto en términos de población afectada como de pérdidas económicas (Alfieri et al., 2017).

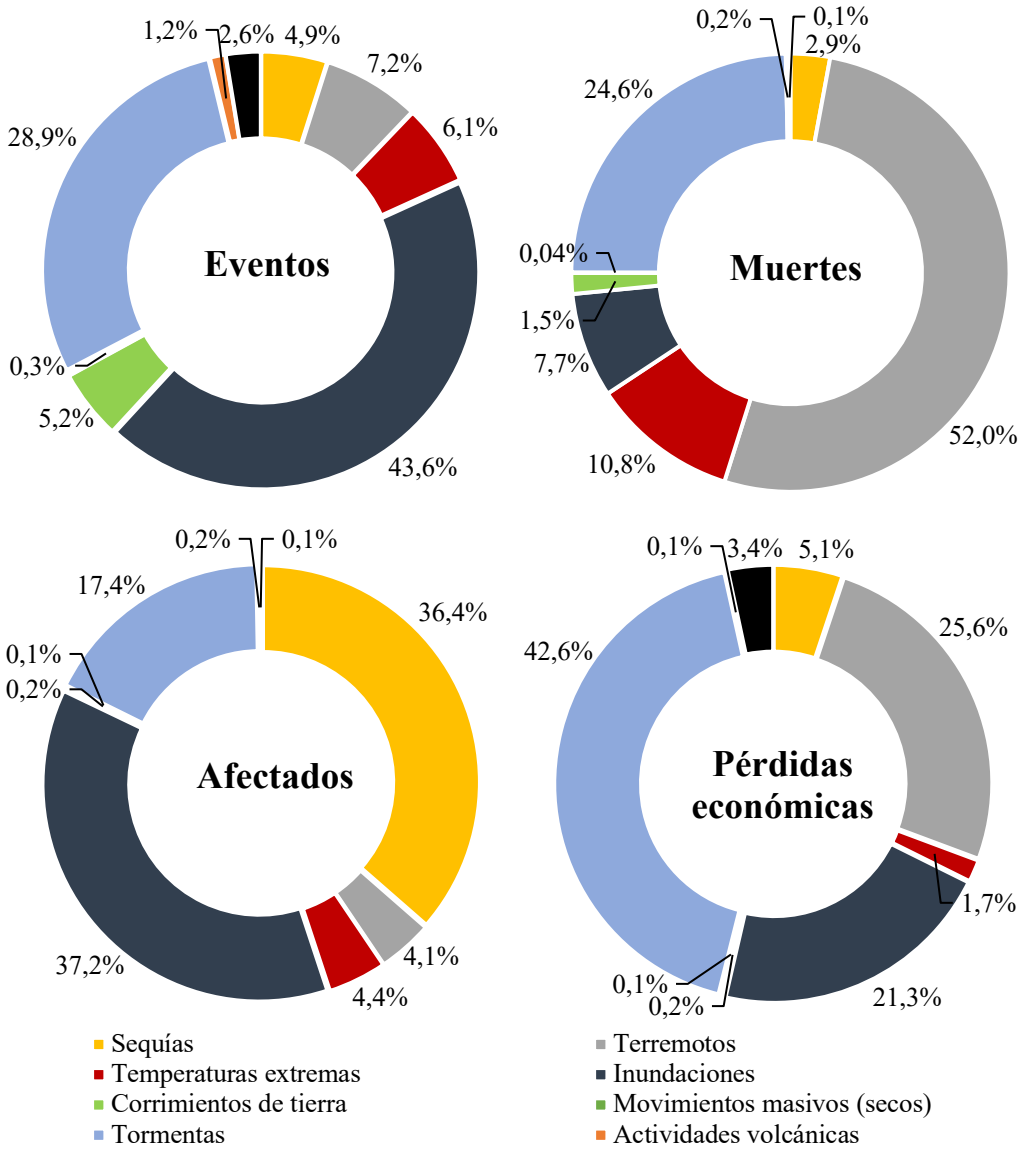


Figura 1. Porcentaje de eventos, muertes, afectados y pérdidas económicas por tipo de desastre natural: 2008-2018. Fuente: elaboración propia a partir de CRED (2019).

Por todo ello, la adecuada gestión y comunicación del riesgo de inundaciones se sitúan como aspectos críticos para mejorar la resiliencia social de las comunidades afectadas y reducir los efectos negativos que las inundaciones tienen en su calidad de vida (Bodoque et al., 2016; Borga et al., 2011; Khalili et al., 2015). En este sentido, basándose en la premisa de que no existe seguridad absoluta o "riesgo cero" de inundación, la Directiva 2007/60/CE relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación incluye la necesidad de adoptar marcos integrales de gestión de riesgos (Kubal et al. 2009). Además, distintos trabajos previos han enfatizado la adecuación de que los planes de gestión y comunicación del riesgo de inundaciones consideren la dimensión social de este e incorporen en su formulación el análisis de la percepción psicosocial (Amérigo et al., 2019). Esta perspectiva psicosocial cuenta con un gran potencial a la hora ofrecer guías para el diseño e implementación de planes de gestión del riesgo de inundaciones, incrementar la efectividad de las estrategias de comunicación de este tipo de riesgos y mejorar la implementación de intervenciones con distintos públicos objetivos, tales como población afectada por inundaciones o grupos de interés (*stakeholders*, en terminología anglosajona) en los recursos hídricos.

Así, el objetivo de este trabajo es doble. Por un lado, busca presentar una síntesis teórica de los principales procesos psicológicos relacionados con la evaluación del riesgo de inundaciones. Por otro lado, pretende ilustrar desde un punto de vista más práctico cómo el análisis de la percepción social puede ser útil para la gestión y comunicación del riesgo de inundaciones, exponiendo dos casos de estudio realizados: (1) con población residente en un municipio expuesto frecuentemente a inundaciones, Navaluenga (Ávila); y (2) con distintos grupos de interés en el tramo del río Duero entre Toro y Zamora.

Para dar cumplimiento a estos objetivos, además de esta introducción, el trabajo se estructura en cuatro apartados más. A continuación, se expone de manera sucinta una taxonomía de los procesos psicológicos implicados en la evaluación del riesgo de inundaciones (incluyendo la percepción, adaptación y comunicación). En los aparatados tercero y cuarto se desarrollan los dos casos de estudio mencionados en el párrafo anterior. Finalmente, en el quinto aparatado se exponen las principales conclusiones de este trabajo.

2. PROCESOS PSICOLÓGICOS IMPLICADOS EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES

Tal y como exponen Amérigo et al. (2019), en la literatura científica sobre riesgos de inundaciones son escasos los intentos por sistematizar los principales procesos psicológicos vinculados con la evaluación de este tipo de riesgos. Por ello, estos autores se inspiran en las revisiones de Bubeck et al. (2012) y Kellens et al. (2013) para proponer un marco conceptual integrado por tres tipos de procesos psicológicos que se retroalimentan mutuamente y que aparecen recogidos en la Figura 2: percepción, adaptación y comunicación. En primer lugar, se encuentran los procesos de percepción relacionados con variables relativas a la probabilidad de sufrir una inundación, vulnerabilidad percibida, y a la evaluación de sus posibles consecuencias, gravedad percibida (Bubeck et al., 2012). En segundo lugar, se incluyen los procesos de adaptación orientados a reducir el impacto de la inundación, que según Terpstra y Lindell (2013) vendrían determinados por la evaluación del afrontamiento que hacen las personas con relación al peligro y por los recursos con los que cuentan para ello (en términos de dinero, tiempo y esfuerzo, conocimientos y habilidades, y ayuda y cooperación de otras personas). Finalmente, estarían los procesos de comunicación del riesgo, vinculados con los intercambios de información intencionales sobre riesgos de inundaciones que se producen entre distintos agentes interesados (individuos, grupos de interés u organizaciones). Como se comentaba anteriormente, estos tres procesos están interrelacionados entre sí y estrechamente vinculados, aunque la literatura científica ha puesto, comparativamente, mucho más énfasis en el estudio de los dos primeros que en el último (Amérigo et al., 2019).

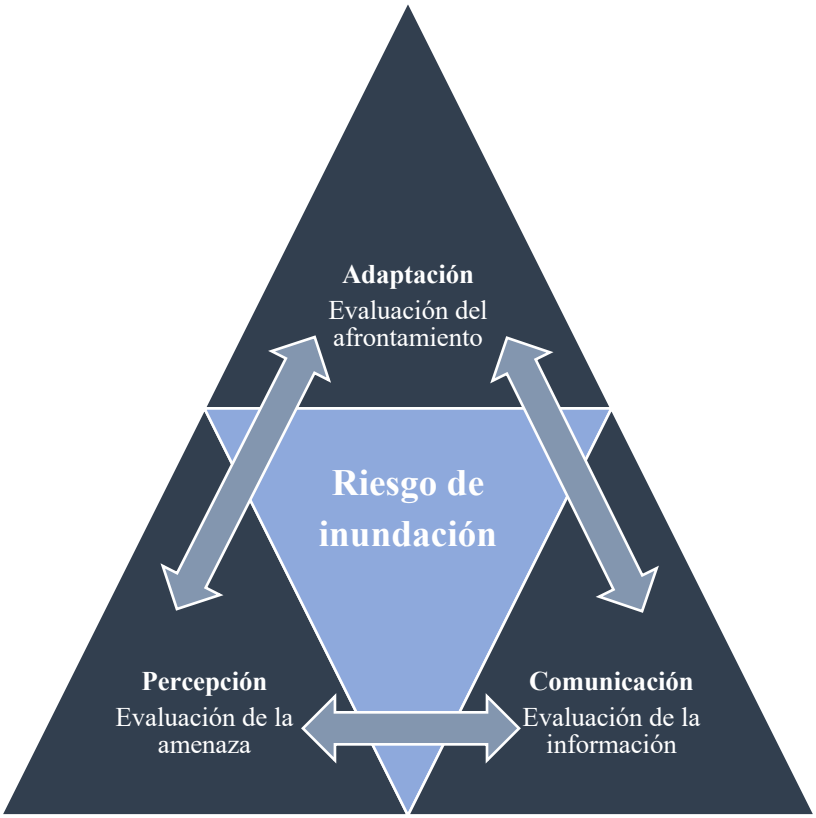


Figura 2. Principales procesos psicológicos implicados en la evaluación del riesgo de inundaciones. Fuente: adaptado de Amérigo et al. (2019, p. 199).

En relación con los procesos mencionados anteriormente, investigaciones previas, sobre todo en el ámbito psicosocial, han identificado la existencia de una serie de sesgos heurísticos, que suponen un reto para la gestión del riesgo de inundaciones. Dentro de estos sesgos, cabe destacar tres: la normalización del riesgo, la ilusión positiva y la hipermetropía ambiental. El efecto de la normalización del riesgo consiste en que, en contra de lo que cabría esperar, la conciencia del riesgo debida a una mayor exposición al mismo se traduce en una menor percepción del riesgo (Luís et al., 2015). Por su parte, la ilusión positiva es una forma de hacer frente psicológicamente al riesgo, confiando en la capacidad de las medidas de mitigación actuales para controlar la aparición de peligros (Schmidt et al., 2014). Finalmente, la hipermetropía ambiental lleva a que las personas tiendan a percibir los problemas ambientales como más graves cuanto más alejados se encuentran de ellos (Uzzell, 2000). En relación con este último sesgo, Bodoque et al. (2019) encuentran que las personas consideran que la probabilidad de riesgo de inundación es mayor cuando ocurre más lejos que cerca de ellos de acuerdo con las dimensiones espaciales (fuera de su hogar) y temporales (en un momento del tiempo muy alejado). Además, en una investigación posterior, Guardiola-Albert et al. (2020) obtienen que la relación geoestadística de la distancia de la vivienda a la zona de inundación (realidad objetiva) con la percepción del riesgo de inundación de la vivienda (vulnerabilidad percibida) sigue un patrón congruente cuando la evaluación del riesgo se realiza en el corto plazo. Sin embargo, esta relación congruente con la realidad objetiva no se produjo cuando se evaluó la percepción del riesgo a largo plazo.

Teniendo en cuenta los procesos descritos anteriormente, a continuación, se presentan dos casos de estudio. El primero, aplicado a población residente, tiene en cuenta los procesos de percepción del riesgo de inundación y el conocimiento de las acciones a realizar antes, durante y después de una inundación para el diseño de una estrategia de comunicación del riesgo de inundación. El segundo,

aplicado al caso de los grupos de interés, analiza la efectividad percibida de distintas medidas u acciones para reducir el riesgo de inundación y evalúa cómo tales percepciones pueden ser útiles para el diseño de un plan de comunicación que tenga en cuenta estas divergencias en sus percepciones e intereses.

3. RIESGO PERCIBIDO DE INUNDACIÓN Y CONOCIMIENTO DEL PLAN DE PROTECCIÓN CIVIL: LA PERSPECTIVA DE LA POBLACIÓN RESIDENTE

3.1. Método

En este primer caso, la localidad del estudio es Navaluenga (Ávila). Este municipio está localizado en las márgenes del río Alberche y del arroyo Chorrerón (ver Figura 3); y cuenta con una población residente que ronda los 2.000 habitantes según el Instituto Nacional de Estadística (Bodoque et al., 2016, 2019). Sin embargo, durante los fines de semana esta cifra se sitúa entre 5.000 y 10.000 personas, llegando a multiplicar por diez su población durante la época estival (Ayuntamiento de Navaluenga, 2014).

Navaluenga es un municipio propenso a sufrir un tipo de inundaciones repentinas denominadas avenidas torrenciales súbitas (*flash flood*, en inglés). Como se muestra en la Figura 4, en los últimos 100 años, este municipio ha experimentado al menos 34 inundaciones, con un promedio de 3,4 eventos de inundación por década. Aunque ninguna de estas inundaciones ha revestido consecuencias catastróficas, cabe destacar la alta periodicidad con la que se producen (Ayuntamiento de Navaluenga, 2014). Además, los últimos eventos, incluido el de marzo de 2018, provocaron enormes pérdidas económicas y afectaron a parte de la población (Bodoque et al., 2016), con el consiguiente impacto negativo en la calidad de vida de la población residente en la localdiad. Cabe señalar que el municipio cuenta desde el año 2014 con un Plan de Protección Civil de actuación municipal ante el riesgo de inundaciones (Ayuntamiento de Navaluenga, 2014).

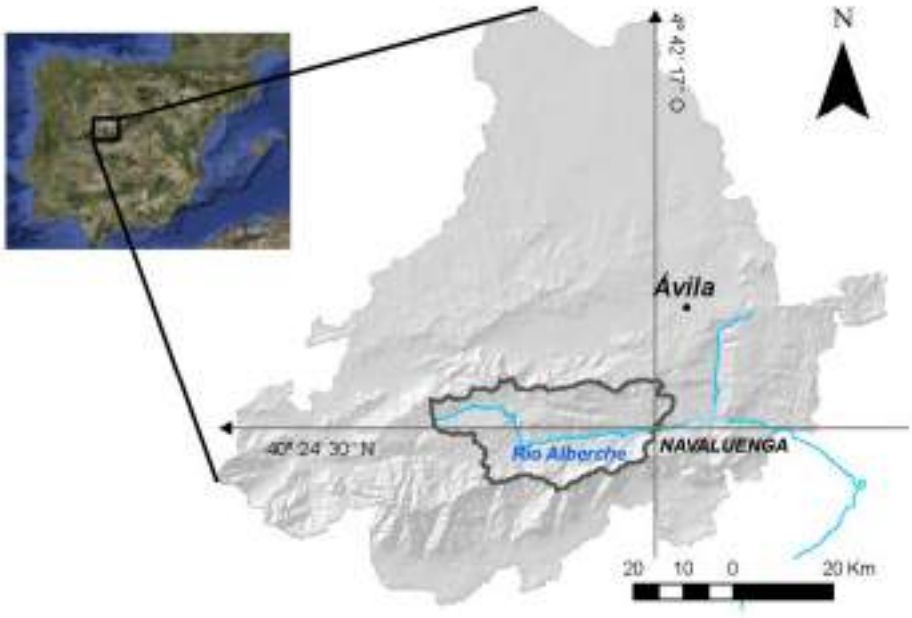


Figura 3. Zona de estudio: Navaluenga

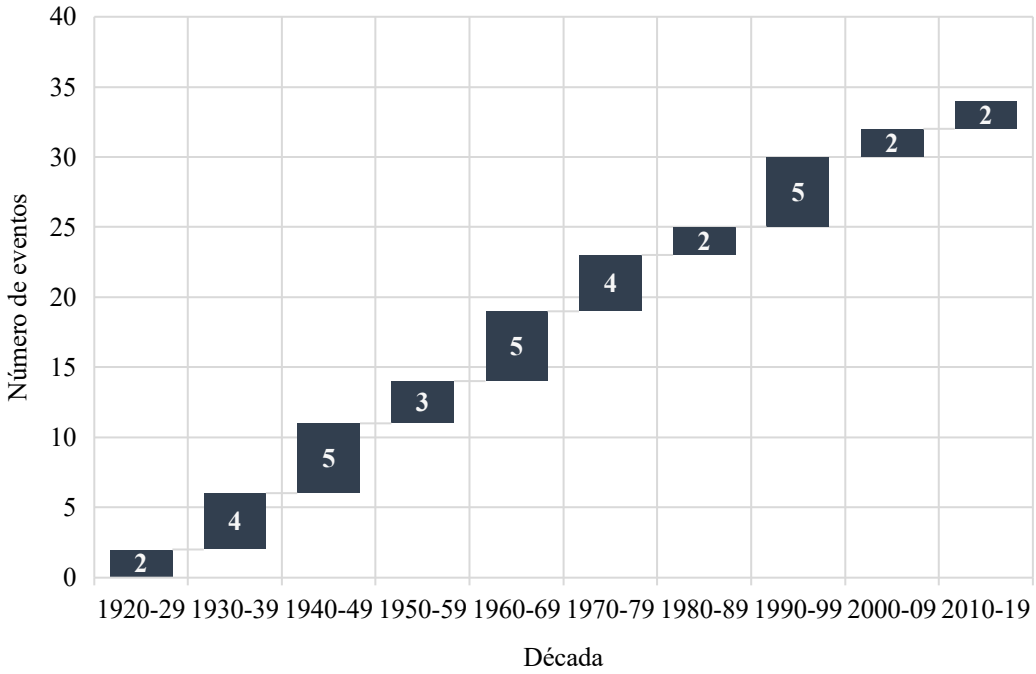


Figura 4. Número de inundaciones por década en Navaluenga: 1920-2019. Fuente: elaboración propia a partir de Díez-Herrero (2001) y actualizado con noticias de prensa.

Para dar cumplimiento a los objetivos del estudio, la propuesta metodológica en este caso estaba estructurada en tres etapas: (1) investigación pre-intervención; (2) diseño e implementación de la estrategia de comunicación del riesgo de inundación; y (3) investigación post-intervención. El proceso propuesto tuvo una duración aproximada de 11 meses, desarrollándose entre febrero de 2015 y enero de 2016. Los detalles completos del mismo se encuentran disponibles para el lector en los trabajos de Bodoque et al. (2016, 2019).

Para las investigaciones realizadas antes y después de la implementación de la estrategia de comunicación, se diseñó un cuestionario ad-hoc administrado personalmente que incluía cuatro ítems para medir la percepción del riesgo de inundación en el municipio/hogar en el corto/largo plazo (5 próximos años/a lo largo de la vida, respectivamente). Estos ítems estaban formulados en una escala tipo Likert de cinco posiciones, desde 1 = "muy improbable" a 5 = "muy probable", y se basaban en la propuesta de Bourque et al. (2013). Para los análisis posteriores se procedió a presentar las medias en estos cuatro ítems en una escala de 0 a 100, con el fin de facilitar su interpretación. Para evaluar el nivel de conocimiento de las acciones a adoptar antes, durante y después de la inundación, se preguntó a los encuestados si sabían qué acciones debían hacer en cada caso y se les pidió que las mencionaran. Sus respuestas se contrastaron con las acciones recogidas en el Plan de Protección Civil (Ayuntamiento de Navaluenga, 2014), midiéndose el grado de conocimiento como el porcentaje de respuestas correctas mencionadas por cada persona. Además, se incluyeron en el cuestionario distintas variables sociodemográficas y de caracterización de los encuestados.

3.2. Resultados

A continuación, se describen de manera sintética los resultados obtenidos en cada una de las tres etapas interconectadas entre sí. En la primera etapa, se realiza un diagnóstico y segmentación de los encuestados según sus percepciones sobre el riesgo de inundación y el conocimiento de las acciones a adoptar antes, durante y después de la inundación. La información de esta primera etapa sirve como retroalimentación de la segunda, ya que el diseño e implementación de la estrategia de comunicación del riesgo de inundación se sustentan en la percepción social de la población residente. Finalmente,

en la tercera etapa, se evalúa el impacto de la estrategia de comunicación comparando los resultados de percepción y conocimiento con los obtenidos en la primera.

3.2.1. Investigación pre-intervención: diagnóstico y segmentación

El punto de partida del estudio consistió en una investigación pre-intervención basada en una encuesta aplicada a una muestra representativa de 254 residentes (es decir, más del 10% de la población de Navaluenga). El análisis descriptivo de los resultados obtenidos reveló que tanto la percepción del riesgo de inundación como el conocimiento de las acciones a adoptar antes, durante y después de la inundación eran muy bajos. Además, se observó que se percibía un mayor riesgo de inundación: (1) en el municipio que en el hogar; y (2) a largo que a corto plazo. Así, la puntuación más alta correspondía al ítem que medía la percepción del riesgo de inundación a largo plazo en Navaluenga, con una media de 48 puntos en una escala de 0 a 100. En el caso del conocimiento, este era algo más alto en el caso de las acciones a adoptar antes de abandonar la casa, con un 39% de respuestas correctas.

Además, se realizó un análisis clúster de clases latentes. Esta es una técnica de segmentación que permite identificar clústeres heterogéneos entre sí y homogéneos en sí en relación con una serie de variables o criterios de segmentación, denominadas indicadores (Wedel y Kamakura, 2000). Se identificaron tres grupos diferentes de acuerdo con su percepción del riesgo de inundación y el conocimiento de las acciones a adoptar antes, durante y después de una inundación, que representaban el 61%, 24% y 15% de la muestra, respectivamente. Estos grupos también diferían en cuanto a edad, situación familiar, tipo de vivienda y ubicación de esta o no en el área inundable (Bodoque et al., 2016). Así, el Clúster 1 tenía una baja percepción del riesgo y un bajo conocimiento, estaba formado principalmente por personas mayores de 54 años, que vivían en pareja o con personas dependientes a su cargo, en una casa con dos plantas o en un piso y fuera del área inundable. El Clúster 2 tenía, en comparación con los otros dos, una elevada percepción del riesgo, pero contaban con un bajo conocimiento. Dentro de este clúster predominaban personas con una edad entre 35 y 54 años, con hijos mayores de doce años, que residían en una casa con sótano o piso y dentro del área inundable. El Clúster 3 tenía una elevada percepción del riesgo de inundación a largo plazo y poseía un mayor nivel de conocimiento, respecto a los otros dos clústeres. En este caso, se trababa del segmento de menor edad (una tercera parte tenía entre 18 y 34 años), que vivían en pareja o con personas dependientes a su cargo, en una casa de planta baja y dentro del área inundable.

Esta segmentación permitió establecer un orden de prioridades en relación con los segmentos a los que dirigir la estrategia de comunicación del riesgo de inundación. Así, el Clúster 2 resultó ser prioritario debido a su bajo nivel de conocimiento y a que dos de cada tres personas de este clúster residían en la zona inundable del municipio. El Clúster 1 también fue considerado como relevante debido a su perfil (baja percepción de riesgo y baja conocimiento) y su gran tamaño (61% del total de la muestra).

3.2.2. Estrategia de comunicación del riesgo de inundación

La estrategia de comunicación diseñada estaba compuesta por cuatro tipos de actividades: (1) una charla informativa sobre inundaciones; (2) un concurso de preguntas y respuestas sobre los diferentes contenidos del Plan de Protección Civil; (3) una exposición de historias, fotografías y vídeos sobre inundaciones pasadas; y (4) una serie de talleres intergeneracionales.

En la Figura 5 se recogen diversas fotografías sobre las actividades propuestas, un ejemplo de una de las rondas que integraban el concurso de preguntas y respuestas, y el cartel empleado para presentar la estrategia de comunicación del riesgo de inundación. Todas las actividades se desarrollaron durante el mes de noviembre de 2015, con la única excepción de la charla informativa que se realizó el 30 de octubre.



Charla informativa sobre inundaciones



Concurso de historias, fotografías y vídeos sobre inundaciones pasadas



Primera ronda de preguntas: 9 de noviembre de 2015

Concurso de preguntas y respuestas sobre el Plan de Protección Civil



Cartel de presentación de la estrategia de comunicación del riesgo de inundación

Figura 5. Estrategia de comunicación del riesgo de inundación.

Como ya se ha comentado anteriormente, estas cuatro actividades fueron diseñadas considerando los clústeres identificados en el primer paso. Para llegar al Clúster 2 (formado principalmente por parejas con niños mayores de 12 años y que tenían un bajo nivel de conocimiento), se propuso el concurso de preguntas y respuestas sobre los diferentes contenidos del Plan de Protección Civil. Esta actividad se realizó en colaboración directa con el Instituto de Educación Secundaria ubicado en el municipio, proponiéndose a los estudiantes como una actividad familiar en la que podían participar respondiendo preguntas una vez por semana. Para llegar a los Clústeres 1 (compuesto por personas mayores con baja percepción de riesgo y bajo conocimiento) y 3 (compuesto por personas más jóvenes), se decidió incluir talleres intergeneracionales en los que los mayores de la localidad y los jóvenes pudieran intercambiar sus experiencias con respecto a las inundaciones. La exposición de historias, fotografías y vídeos sobre las inundaciones pasadas se dirigió principalmente a los Clústeres 1 y 3, y permitió que aquellas fotografías y vídeos de las inundaciones históricas, recopiladas principalmente por la

población de mayor edad del municipio, se conocieran por la población más joven residente. Finalmente, la charla informativa sobre inundaciones se dirigió a toda la población de Navaluenga en su conjunto.

Se entregaron diferentes premios, incluidos certificados para todos los participantes y una tableta y cámara fotográfica para los ganadores del concurso de preguntas y respuestas y de la exposición, respectivamente. Las herramientas de comunicación utilizadas para dar a conocer las diferentes actividades programadas incluían medios on-line (principalmente, página web del Ayuntamiento de Navaluenga, redes sociales y correos electrónicos) y off-line (básicamente, carteles y comunicación boca-oído). Tras la estrategia de comunicación, se comprobó que menos del 20% de los encuestados no conocían ninguna de las actividades que formaban parte de la estrategia de comunicación (Bodoque et al., 2019).

3.2.3. Investigación post-intervención: evaluación de la efectividad

En esta tercera etapa, se recopiló información de 201 participantes de los 254 adultos que participaron en la investigación pre-intervención. Los cambios en la percepción del riesgo de inundación y en las acciones a adoptar antes, durante y después de una inundación aparecen recogidos en la Figura 6. Los datos presentados en la misma permitieron realizar una evaluación precisa del impacto de la estrategia de comunicación. En primer lugar, se observó que la percepción del riesgo de inundación solo había aumentado para el ítem que mide la percepción del riesgo de inundación en Navaluenga a largo plazo. En segundo lugar, se comprobó que la estrategia de comunicación había sido especialmente efectiva a la hora de aumentar el conocimiento de las acciones de protección, antes de abandonar la casa y de regreso al hogar.

Con respecto a la efectividad individual de cada acción que integraba la estrategia de comunicación, la charla informativa permitió mejorar el conocimiento de las rutas de evacuación y los puntos de encuentro. Los talleres intergeneracionales mejoraron el conocimiento de las rutas de evacuación y los puntos de encuentro, junto con las acciones antes de abandonar la casa. Finalmente, el concurso de preguntas y respuestas fue la acción más efectiva, ya que mejoró el conocimiento de tres de las cinco categorías consideradas (comportamientos de preparación, acciones de protección y acciones de regreso a casa).

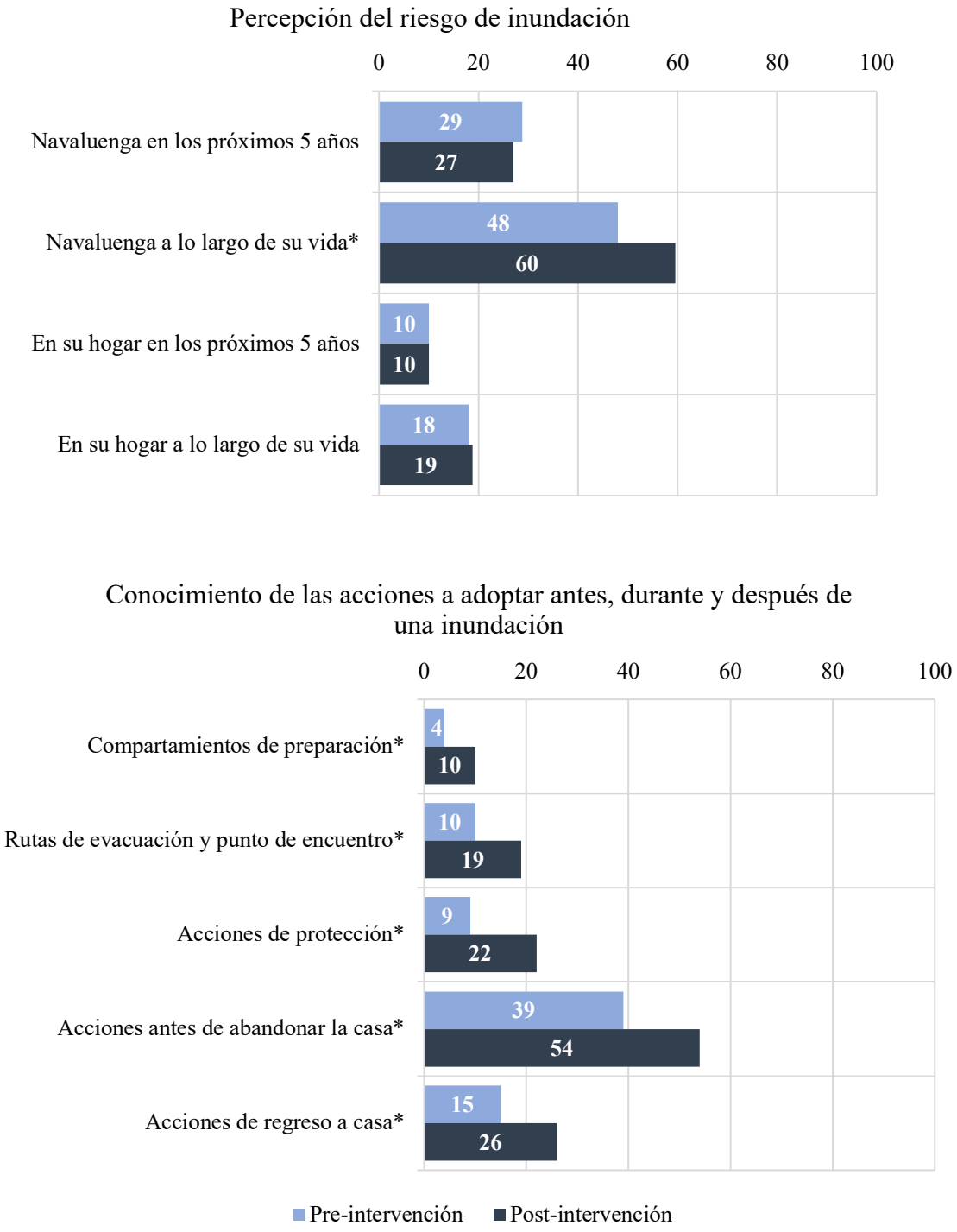


Figura 6. Comparación de la percepción del riesgo de inundación y del conocimiento entre las investigaciones pre-intervención y post-intervención. Fuente: elaboración propia a partir de Bodoque et al. (2019). Nota: *Diferencia de medias estadísticamente significativa ($p < 0,05$).

4. EFICACIA PERCIBIDA DE LAS MEDIDAS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN: LA PERSPECTIVA DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

En este segundo estudio se presenta una aplicación empírica centrada en la perspectiva de los grupos de interés, cuyo objetivo es analizar las discrepancias entre 28 grupos de interés en la eficacia percibida de distintas medidas de gestión del riesgo de inundación como punto de partida para el diseño de un plan de comunicación del riesgo que tenga en cuenta estas divergencias en sus percepciones e intereses. La literatura previa ha demostrado que las relaciones sociales entre los distintos grupos de interés tienen un impacto significativo en cómo estos se comportan y, en consecuencia, se traducen en importantes implicaciones para la gestión y la gobernanza de los recursos ambientales (Bodin y Crona, 2009). De igual forma, la gestión del riesgo de inundación es un proceso muy complejo en el que pueden intervenir distintos grupos de interés (administraciones públicas con competencias en la materia, organismos de intervención, sociedad civil, sectores productivos, etc.) con percepciones e intereses convergentes o divergentes lo que, en último término, puede facilitar o dificultar, respectivamente, la implementación de un determinado tipo de medidas orientadas a la gestión del riesgo de inundación.

4.1. Método

La zona de estudio se encuentra ubicada en el tramo del río Duero entre las localidades de Toro y Zamora (ver Figura 7). En el estudio participaron 28 grupos de interés diferentes, con competencias en los ámbitos nacionales, regionales, provinciales, comarcales y locales, incluyendo administraciones públicas, servicios de protección civil, asociaciones de consumidores y vecinos, grupos ecologistas y asociaciones no gubernamentales, empresas y asociaciones empresariales.

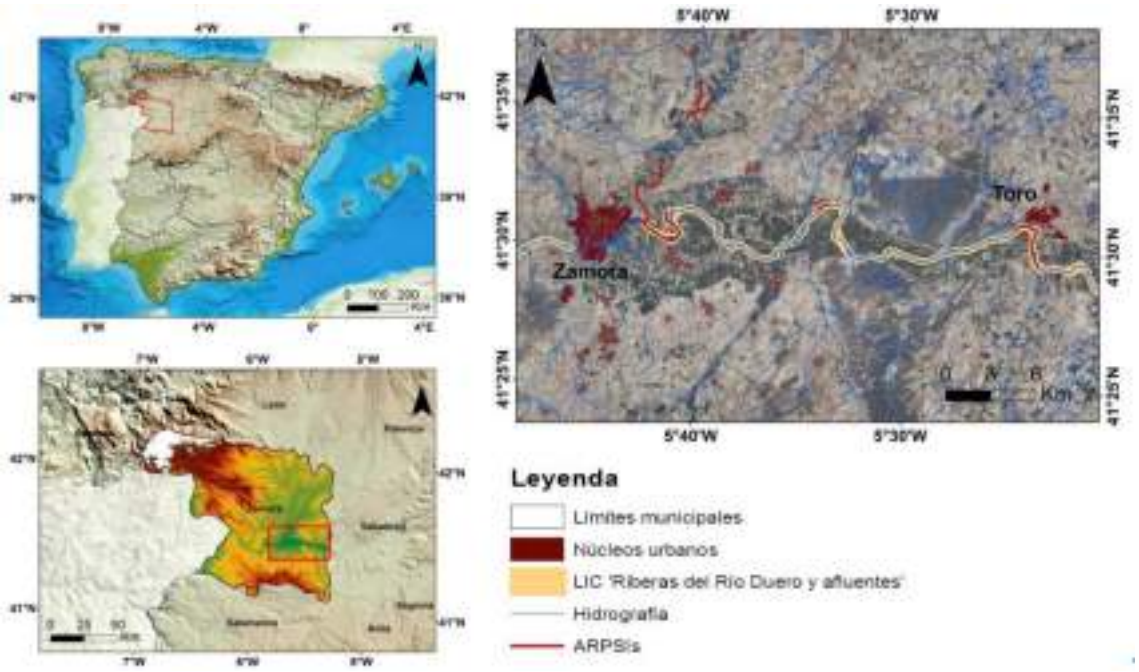


Figura 7. Zona de estudio: tramo del río Duero entre las localidades de Toro y Zamora.

Los participantes fueron contactados previamente por teléfono o correo electrónico e invitados a completar un cuestionario online diseñado ad-hoc. El cuestionario comenzaba con cinco preguntas dicotómicas (sí/no) relativas al tipo de interés que tenía la organización en cuestión en el río Duero: disponibilidad y abastecimiento de agua, gestión de recursos hídricos, gestión de riesgos ante inundaciones, conservación de la diversidad biológica y ambiental del río, o consumo de agua. A continuación, incluía una pregunta para medir la efectividad percibida de distintas medidas para

reducir el riesgo de inundación a través de nueve ítems adaptados del estudio de Lara et al. (2010). Estos ítems estaban medidos en una escala Likert de cinco posiciones desde 1 = "nada efectiva" hasta 5 = "muy efectiva". Finalmente, el cuestionario concluía con una sección relativa a los datos de clasificación del informante clave que había respondido al cuestionario, incluyendo su edad, sexo, nivel de estudios, organización a la que pertenecía y cargo/puesto ocupado en la misma.

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el análisis clúster de clases latentes. En este caso se trataba de evaluar la heterogeneidad de los grupos de interés según la eficacia percibida de nueve medidas distintas de gestión del riesgo de inundación. Además de estas nueve variables (utilizadas como indicadores), se incluyeron como covariables las cinco preguntas dicotómicas relativas al tipo de interés que tenía la organización en el río. Estas covariales servían para describir o caracterizar los grupos identificados. El programa estadístico empleado fue LatentGold® 5.1 (Vermunt y Magidson, 2016).

4.2. Resultados

Para identificar el número óptimo de clústeres se estimaron cinco modelos, incorporando desde uno hasta cinco clústeres. Con el fin de evaluar la parsimonia y bondad de ajuste de cada modelo se utilizó el criterio de información de Akaike (*Akaike information criterion*, AIC). Se aceptó aquel modelo que arrojó un menor AIC, seleccionándose el que segmentaba a los 28 grupos de interés en cuatro clústeres (ver Tabla 1). Siguiendo la propuesta de García (2017), se estimaron los modelos diez veces utilizando diferentes valores de partida aleatorios, lo que permitió asegurar la superioridad del modelo de cuatro clústeres respecto al resto.

Modelo	Log-verosimilitud (LL)	AIC (LL)	Número de parámetros	Error de clasificación
1 clúster	-378,168	792,336	18	0,000
2 clústeres	-328,278	740,557	42	0,002
3 clústeres	-293,172	718,344	66	0,001
4 clústeres*	-263,704	707,409	90	0,001
5 clústeres	-243,451	714,903	114	0,001

Tabla 1. Evaluación de modelos con diferente número de clústeres. Nota: *Mejor modelo de acuerdo con el criterio AIC.

Tras seleccionar el número de clústeres, se evaluó la utilidad de las variables incluidas en el análisis, tanto de los indicadores como de las covariables (ver Tabla 2). Para siete de los nueve indicadores el nivel de significación asociado al estadístico de Wald robusto fue menor que 0,05, indicando que existían diferencias entre los clústeres en la eficacia percibida de esas siete medidas de gestión del riesgo de inundación. En el caso de las medidas relativas a la eliminación de estructuras fijas y la prohibición de edificar en zonas de inundación su efectividad percibida era homogénea entre los cuatro clústeres. El R^2 para los indicadores del modelo oscilaba entre el 63,1%, para la medida relativa a la construcción de embalses de laminación aguas arriba, y el 11,4%, para la relacionada con la eliminación de estructuras fijas. En el caso de las covariables, tres de las cinco consideradas resultaron ser útiles para describir o caracterizar los clústeres obtenidos ($p < 0,05$).

Variables	Estadístico de Wald robusto	*p*	R^2
Indicadores (efectividad de diferentes medidas para reducir el riesgo de inundación)			
Canalización o encauzamiento del río	82,877	0,000	57,0%
Levantamiento de nuevas motas	47,427	0,000	50,9%
Construcción de embalses de laminación	61,265	0,000	63,1%
Eliminación de estructuras fijas	3,583	0,310	11,4%
Reforestación de riberas	41,903	0,000	53,1%
Ampliación del espacio fluvial	39,192	0,000	54,1%
Prohibición de edificar	7,101	0,069	28,6%
Elaboración de planes de emergencia	39,442	0,000	30,4%
Implicación de la población	15,069	0,002	43,0%
Covariables (interés en el río)			
Disponibilidad y abastecimiento de agua	13,269	0,004	n.a.
Gestión de recursos hídricos	0,967	0,810	n.a.
Gestión de riesgos ante inundaciones	15,354	0,002	n.a.
Conservación de la diversidad biológica y ambiental del río	12,722	0,005	n.a.
Consumo de agua	7,294	0,063	n.a.

Tabla 2. Significación de los parámetros estimados para el modelo con cuatro clústeres. Nota: n.a.: no aplicable. Los indicadores y covariables que no resultan estadísticamente significativos ($p > 0,05$) aparecen sombreados en color gris.

De forma detallada, en la Tabla 3 aparece el tamaño y perfil de los cuatro clústeres. Para facilitar la interpretación, los valores más altos por filas aparecen sombreados en color verde. Así, el Clúster 1 está formado por ocho grupos de interés diferentes que perciben un nivel de efectividad más alto en cinco de las medidas propuestas por lo que podría considerarse que es un clúster que defiende enfoques de gestión más integrales del riesgo de inundación. El principal interés en el río de los grupos de interés que conforman este clúster tiene que ver con la conservación de la diversidad biológica y ambiental del río (87%). El Clúster 2 también está conformado por otros ocho grupos de interés y, en este caso, su principal rasgo distintivo es que perciben una elevada eficacia de medidas de reducción del riesgo de inundación relacionadas con la reforestación de las riberas y la ampliación del espacio fluvial naturalmente inundable, lo que los convierte en defensores de lo que podríamos denominar estructuras verdes.

Variables	Clúster 1 (*n* = 8)	Clúster 2 (*n* = 8)	Clúster 3 (*n* = 6)	Clúster 4 (*n* = 6)
Indicadores (efectividad de diferentes medidas para reducir el riesgo de inundación)				
Canalización o encauzamiento del río	3,4	1,0	1,7	3,3
Levantamiento de nuevas motas	3,5	1,4	1,8	2,8
Construcción de embalses de laminación	4,2	1,6	2,3	2,5
Reforestación de riberas	3,8	4,9	3,5	4,5
Ampliación del espacio fluvial	4,4	5,0	4,2	2,8
Elaboración de planes de emergencia	5,0	4,5	4,2	3,8
Implicación de la población	4,8	4,5	4,3	2,7
Covariables (interés en el río)				
Disponibilidad y abastecimiento de agua				
No	50%	75%	33%	33%
Sí	50%	25%	67%	67%
Gestión de riesgos ante inundaciones				
No	62%	75%	33%	83%
Sí	38%	25%	67%	17%
Conservación de la diversidad biológica y ambiental del río				
No	13%	13%	50%	50%
Sí	87%	87%	50%	50%

Nota: Los valores más altos por filas aparecen sombrados en color verde.

Tabla 3. Tamaño y perfil de los cuatro clústeres identificados

La mayoría de los grupos de interés que forman parte de este clúster no tienen intereses relacionados con la disponibilidad y abastecimiento de agua ni con la gestión de riesgos ante inundaciones, destacando sus intereses relacionados con la diversidad biológica y ambiental del río. El Clúster 3 está integrado por seis grupos de interés y tiende a presentar puntuaciones intermedias en las siete medidas de gestión que sí discriminan entre los clústeres. En este caso, dos terceras partes de los grupos de interés que lo integran tienen intereses relacionados con la disponibilidad y abastecimiento de agua y la gestión de riesgos ante inundaciones. Finalmente, los seis grupos de interés que forman el Clúster 4 únicamente destacan respecto a los otros clústeres porque son, junto con el Clúster 1, los que perciben una mayor eficacia de medidas de canalización o encauzamiento del río. Su principal interés en el río tiene que ver con la disponibilidad y abastecimiento de agua, al igual que sucedía con el Clúster 3.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo pretende ser de utilidad para que los organismos encargados de la gestión del riesgo de inundación integren el análisis de la percepción social en sus estrategias de gestión y comunicación del riesgo de inundaciones. A partir de dos aplicaciones empíricas se pone en valor la oportunidad que supone incorporar la dimensión social del riesgo de inundación en este tipo de estrategias.

En cuanto al primer estudio, relacionado con la población residente en el municipio de Navaluenga, se ha presentado una estrategia de comunicación diseñada partiendo de la base de una investigación preliminar y se han evaluado sus resultados efectuando una nueva investigación con posterioridad.

Este tipo de enfoques son poco habituales tanto en la literatura académica como en las aplicaciones prácticas. No obstante, para mejorar la resiliencia de la población expuesta a este tipo de eventos se requiere que propuestas holísticas que complementen las intervenciones estructurales y las basadas en la recuperación de las riberas o la ampliación del espacio fluvial con otras medidas orientadas a que la población esté mejor preparada para hacer frente a inundaciones. La estrategia de comunicación diseñada ha demostrado ser realmente efectiva para incrementar el conocimiento de las acciones a adoptar antes, durante y después de una inundación, pero no lo ha sido tanto a la hora de incrementar la percepción del riesgo de inundación. Dos razones principales podrían explicar la baja efectividad de la estrategia de comunicación a la hora de mejorar la percepción del riesgo de inundación. La primera de ellas tiene que ver con el diseño de la estrategia de comunicación en sí, ya que las actividades más innovadoras, especialmente el concurso de preguntas y respuestas, tenían como objetivo principal mejorar el conocimiento de los contenidos del Plan de Protección Civil. Además, la estrategia de comunicación se concentró en un único mes. El segundo elemento que ayuda a explicar la baja efectividad de la campaña en lo que respecta a la mejora de la percepción del riesgo de inundación está relacionado con los sesgos heurísticos expuestos en el segundo apartado de este trabajo. Estos sesgos podrían explicar el hecho de que, a pesar de haber recibido información sobre el riesgo de inundación, las personas tiendan a pensar que "estos eventos ocurrieron hace mucho tiempo", "no afectarán ni a ellos ni a nadie de su familia" y, "en caso de ocurrir, afectarán al municipio pero en un futuro lejano". En futuros estudios sería interesante tener en cuenta estos sesgos y diseñar estrategias de intervención que proporcionen las herramientas necesarias para hacer resiliente a la población expuesta a este tipo de riesgos.

En cuanto al segundo estudio, realizado con diferentes grupos de interés en el tramo del río Duero entre las localidades de Toro y Zamora, se han identificado cuatro clústeres con percepciones muy distintas en relación con la efectividad percibida de distintas medidas para reducir el riesgo de inundación. Estos clústeres, además, tienen distintos intereses en el río, lo que permite identificar prioridades y grupos concretos sobre los que actuar para el diseño de campañas de comunicación orientadas a evitar conflictos o reducir las divergencias entre las percepciones de los distintos grupos. Adicionalmente, en la actualidad se está trabajando, utilizando la metodología del análisis de redes sociales (*social network analysis*, en terminología anglosajona), para identificar qué nodos (grupos de interés) están más y menos conectados entre sí dentro, cómo de densa es la red que relaciona o comunica a los distintos grupos de interés entre sí y cómo perciben la comunicación los distintos actores implicados. Estos resultados, ofrecen un gran potencial futuro para avanzar hacia enfoques holísticos o integrales que sean capaces de mejorar la gestión y comunicación del riesgo de inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este trabajo provienen de diversas investigaciones financiadas por los proyectos DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-1-R; AEI/FEDER, UE), del Plan Estatal de Investigación del Gobierno de España, y ADApTAR (SBPLY/17/180501/000416), del Plan Regional de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (JCCM).

REFERENCIAS

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K. & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, *5*(2), 171–182. https://doi.org/10.1002/2016EF000485
- Amérigo, M., García, J. A., Pérez-López, R. & Talayero, F. (2019). Challenges to deal with climate change: Analysis of flash flood risk perception. *Papeles del Psicólogo*, *40*(3), 197–204. https://doi.org/10.23923/pap.psicol2019.2903

- Ayuntamiento de Navaluenga (2014). *Plan de protección civil de actuación municipal ante el riesgo de inundaciones de Navaluenga (Ávila)*. https://aytonavaluenga.es/wp-content/uploads/2015/10/Plan-de-Protecci%C3%B3n-Civil-ante-el-riesgo-por-inundaciones-de-Navaluenga.pdf
- Bodin, O. & Crona, B. I. (2009). The role of social networks in natural resource governance: What relational patterns make a difference? *Global Environmental Change*, *19*(3), 366–374. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.05.002
- Bodoque, J. M., Amérigo, M., Díez-Herrero, A., García, J. A., Cortés, B., Ballesteros-Cánovas, J. A. & Olcina, J. (2016). Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, *541*, 665–676. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.005
- Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Amérigo, M., García, J. A. & Olcina, J. (2019). Enhancing flash flood risk perception and awareness of mitigation actions through risk communication: A pre-post survey design. *Journal of Hydrology*, *568*, 769–779. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.007
- Borga, M., Anagnostou, E. N., Blöschl, G. & Creutin J. D. (2011). Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. *Environmental Science and Policy*, *14*(7), 834–844. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.017
- Bourque, L. B., Regan, R., Kelley, M. M., Wood, M. M., Kano, M. & Mileti, D. S., (2013). An examination of the effect of perceived risk on preparedness behavior. *Environment and Behavior*. *45*(5), 615–649. https://doi.org/10.1177/0013916512437596
- Bubeck, P., Botzen, W. J. & Aerts, J. C. (2012). A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis*, *32*(9), 1481–1495. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01783.x
- CRED (2019). *Natural disasters 2018*. https://www.cred.be/sites/default/files/CREDNaturalDisaster2018.pdf
- CRED (2020). *CRED Crunch 58 - Disaster year in review 2019*. https://cred.be/sites/default/files/CC58.pdf
- Díez-Herrero, A. (2001). *Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche: modelos y S. I. G. para la gestión de riberas*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid. https://eprints.ucm.es/4329
- Directiva 2007/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj
- García, J. A. (2017). Time use patterns of Spanish people at weekends: in search of what, who and when. *Leisure Studies*, *36*(6), 793–810. https://doi.org/10.1080/02614367.2016.1252786
- Guardiola-Albert, C., Díez-Herrero, A. Amérigo, M., Bodoque, J. M., García, J. A., Naranjo-Fernández, N. & Aroca-Jiménez, E. (2020). Analyzing flash flood risk perception through a geostatistical approach in the village of Navaluenga, Central Spain. *Journal of Flood Risk Management*, *13*(1), e12590. https://doi.org/10.1111/jfr3.12590
- Kellens, W., Terpstra, T. & De Maeyer, P. (2013). Perception and communication of flood risks: a systematic review of empirical research. *Risk Analysis*, *33*(1), 24-49. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01844.x
- Khalili, S., Harre, M. & Morley, P. (2015). A temporal framework of social resilience indicators of communities to flood, case studies: Wagga wagga and Kempsey, NSW, Australia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *13*, 248–254. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.009
- Kubal, C., Haase, D., Meyer, V. & Scheuer, S. (2009). Integrated urban flood risk assessment–adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*(6), 1881–1895. https://doi.org/10.5194/nhess-9-1881-2009

- Lara, A., Saurí, D., Ribas, A. & Pavón, D. (2010). Social perceptions of floods and flood management in a Mediterranean area (Costa Brava, Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *10*(10), 2081–2091. https://doi.org/10.5194/nhess-10-2081-2010
- Luís, S., Pinho, L., Lima, M. L., Roseta-Palma, C., Martins, F. C. & Almeida, A. B. (2016). Is it all about awareness? The normalization of coastal risk. *Journal of Risk Research*, *19*(6), 810–826. https://doi.org/10.1080/13669877.2015.1042507
- Schmidt, L., Gomes, C., Guerreiro, S. & O'Riordan, T. (2014). Are we all on the same boat? The challenge of adaptation facing Portuguese coastal communities: Risk perception, trust-building and genuine participation. *Land Use Policy*, *38*, 355–365. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.008
- Terpstra, T. & Lindell, M. K. (2013). Citizens' perceptions of flood hazard adjustments: an application of the protective action decision model. *Environment and Behavior*, *45*(8), 993–1018. https://doi.org/10.1177/0013916512452427
- Uzzell, D. L. (2000). The psycho-spatial dimension of global environmental problem. *Journal of Environmental Psychology*, *20*(4), 307–318. https://doi.org/10.1006/jevp.2000.0175
- Vermunt, J. K. & Magidson, J. (2016). *Technical guide for LatentGold 5.1: Basic, advanced, and syntax*. Statistical Innovations. https://www.statisticalinnovations.com/wp-content/uploads/LGtechnical.pdf
- Wedel, M. & Kamakura W. A. (2000). *Market segmentation: Conceptual and methodological foundations*. Kluwer Academic Publishers.
- Wisner, B. & Adams, J. (2002). *Environmental health in emergencies and disasters: A practical guide*. https://apps.who.int/iris/handle/10665/42561

¿ES LA NORMATIVA ESPAÑOLA UNA HERRAMIENTA ADECUADA PARA LA PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS NATURALES?

Jesús Garrido Manrique
Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Granada, España
jega@ugr.es
https://orcid.org/0000-0002-0002-9888

RESUMEN

Durante los últimos años la ocupación indiscriminada del territorio, principalmente, ha dado lugar a un incremento de las pérdidas socioeconómicas producidas por desastres naturales. En la mayoría de los casos el cambio climático ha contribuido al aumento de las inundaciones y, en menor medida, de los movimientos de ladera. Una de las herramientas más eficaces y eficientes para la prevención de los riesgos naturales es la legislación. En España no existe una normativa específica sobre riesgos naturales existiendo múltiples referencias a los mismos en la legislación sectorial. Es la evaluación ambiental estratégica del planeamiento urbanístico la normativa que constituye el marco jurídico de los riesgos naturales, permitiendo que el articulado que hace referencia a la mitigación de los riesgos naturales incluido en las leyes del suelo, de aguas y de protección civil sea considerado en el planeamiento urbanístico. Sin embargo, el incumplimiento sistemático de la normativa por parte de las Administraciones Públicas hace que las medidas contempladas en las leyes para la mitigación de los riesgos no consigan su objetivo.

1. INTRODUCCIÓN

El impacto socioeconómico de los desastres naturales se ha ido incrementando durante los últimos años, debido principalmente a la ocupación indiscriminada de aquellas zonas expuestas a peligros naturales. El aumento de la frecuencia de las precipitaciones extraordinarias relacionadas con el cambio climático ha incrementado las inundaciones, así como los deslizamientos de ladera. Las inundaciones han provocado las mayores pérdidas de vidas humanas (79% del total de víctimas para el período 1995-2017) siendo además las que han originado las mayores indemnizaciones pagadas por el Consorcio de Compensación de Seguros (Fig. 1 y 3).

Es la protección civil la que el ciudadano suele asociar a los desastres naturales, debido a que sus actuaciones suelen producirse inmediatamente antes, durante y después de un evento catastrófico. Sin embargo, la normativa de protección civil establece también las actuaciones previas a largo plazo. Así, las funciones fundamentales de la protección civil establecidas en el derogado RD 407/1992, de 24 de abril por el que se aprueba la Norma básica de Protección Civil y ratificadas en el Titulo II de la vigente ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil son: previsión (anticipación en la ley 17/2015), prevención, planificación, intervención (respuesta inmediata en la ley 17/2015) y rehabilitación (recuperación en la ley 17/2015). Evidentemente la mitigación de los riesgos debería hacerse a largo plazo basándose en la anticipación y prevención en lugar de hacerlo en el resarcimiento económico de los daños (recuperación).

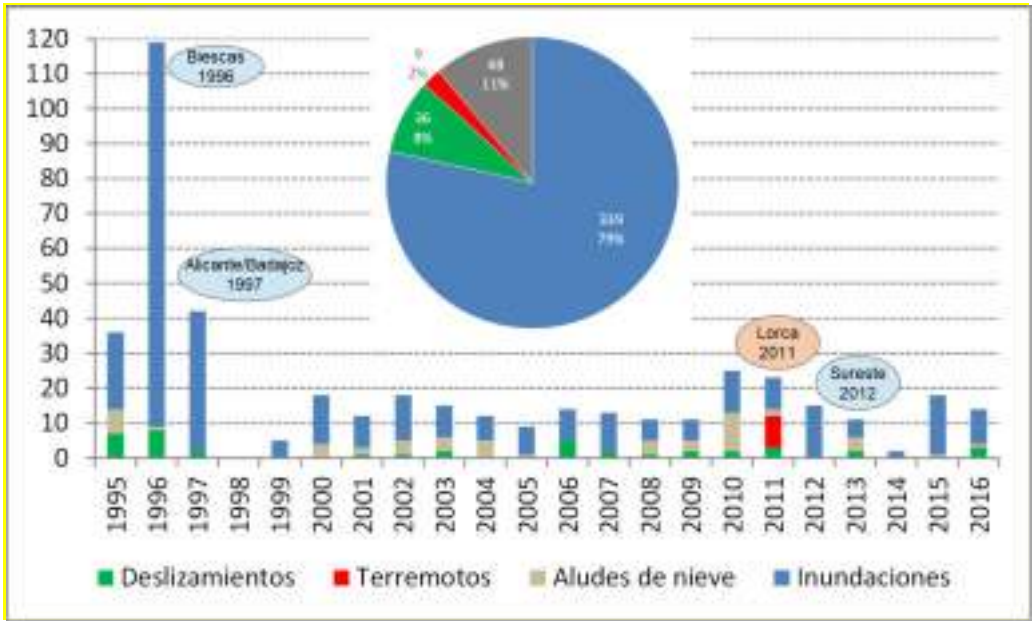


Figura 1. Víctimas mortales por riesgos naturales y eventos al que están asociadas. El gráfico circular muestra las víctimas mortales para el período 1995-2016. Elaboración propia (utilizando datos de Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2018).

Existen diferentes tipos de medidas para la mitigación de los riesgos naturales. Así para el caso de las inundaciones, éstas vienen definidas en el art. 3 del RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación: medidas estructurales "*consistentes en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de generación, acción y propagación de las avenidas alterando sus características hidrológicas o hidráulicas, así como del oleaje, de las mareas o de la erosión en las zonas costeras*" y medidas no estructurales "*aquellas que sin actuar sobre la avenida en sí o sobre la acción del mar, modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación*" (fig. 2). Así, el citado Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, establece que los planes de gestión del riesgo de inundación contemplarán medidas estructurales y no estructurales como:

- restauración fluvial e hidrológico-forestal,
- drenaje de infraestructuras lineales,
- predicción de avenidas y sistemas de alerta
- ordenación territorial y urbanismo,
- medidas estructurales, como presas, encauzamientos y diques de protección
- inundación controlada

Por tanto, a largo plazo podrán establecerse diferentes medidas de mitigación, tanto estructurales como no estructurales. De estas últimas, la legislación, la ordenación territorial y urbanística y la educación son las más adecuadas, siendo las dos primeras las más eficientes y eficaces, entre otros motivos porque permiten disminuir cualquiera de los factores de riesgo: peligrosidad, vulnerabilidad y exposición (fig. 2). La normativa con mayor incidencia en la mitigación de los riesgos naturales es la de evaluación ambiental estratégica, la del suelo y la sectorial, principalmente la de protección civil y la de aguas.

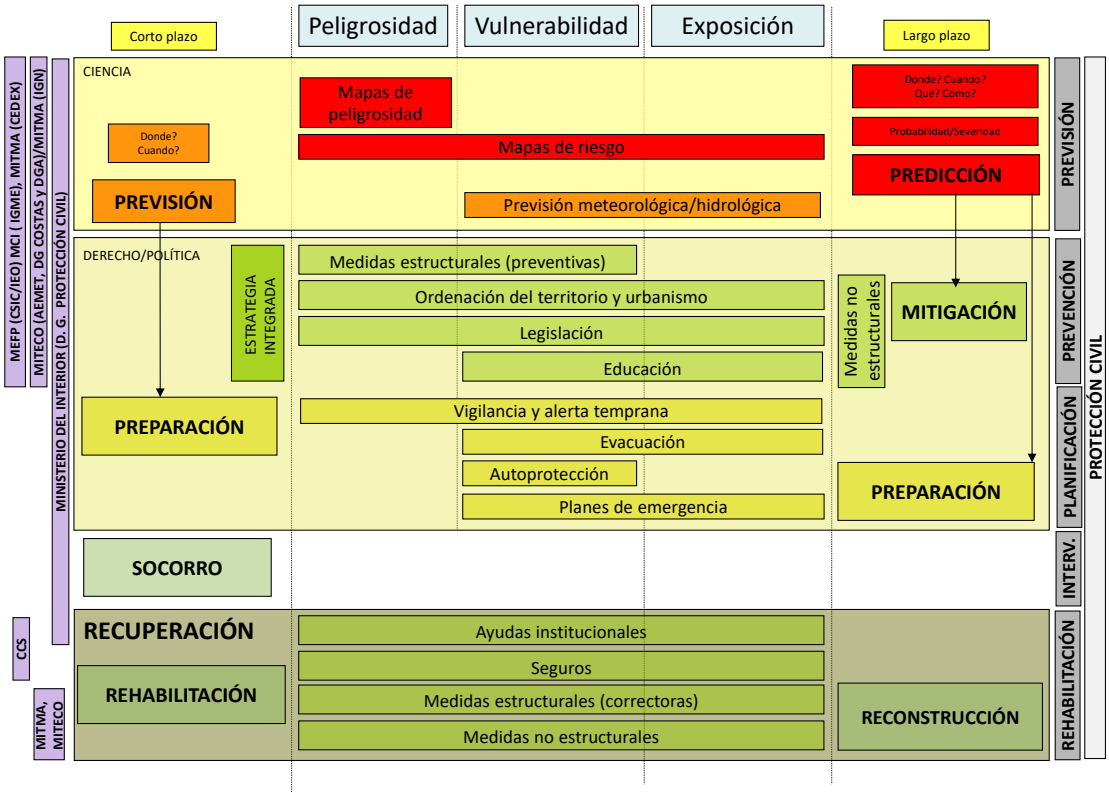


Figura 2. Relaciones entre los factores de riesgo y las distintas funciones de la protección civil.

La estrecha relación existente entre la ordenación territorial y urbanística y la normativa de Protección Civil, entre la que destacan los planes territoriales y especiales de protección civil en los diferentes ámbitos (nacional, autonómico y municipal), se puso de manifiesto, a mediados de los años noventa tanto en la Directriz Básica de Riesgo de Inundaciones como en la de Riesgo Sísmico, que establecen en su acuerdo Segundo que "*Los análisis de riesgos y la zonificación territorial* (análisis de peligrosidad y de riesgo en la D.B. Riesgo Sísmico) *que queden especificados en los planes especiales elaborados, aprobados y homologados, conforme a lo dispuesto en la citada Directriz, serán tenidos en cuenta por los órganos competentes en el proceso de planificación del territorio y de los usos del suelo*". Asimismo, la Orden PCI/488/2019, de 26 de abril, por la que se publica la Estrategia Nacional de Protección Civil establece las siguientes actuaciones prioritarias para minimizar el riesgo de inundación: el fortalecimiento de la vinculación de la planificación de protección civil en los planes de ordenación del territorio, uso del suelo y desarrollo urbanístico; promover el uso del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI); fortalecer los Sistemas de Aviso Hidrológico de los organismos de cuenca y fomentar el desarrollo de nuevas herramientas predictivas en los casos susceptible de causar inundaciones (art. 4.1.4).

Asimismo, el RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación establece que "*Los instrumentos de ordenación territorial y urbanística, en la ordenación que hagan de los usos del suelo, no podrán incluir determinaciones que no sean compatibles con el contenido de los planes de gestión del riesgo de inundación, y reconocerán el carácter rural de los suelos en los que concurran dichos riesgos de inundación o de otros accidentes graves*" (art. 15.1).

Desde el punto de vista de los riesgos naturales, los instrumentos del planeamiento urbanístico, por cuanto regulan los usos y actividades del suelo, son la clave para su prevención (Olcina, 2007). Así, el mapa de riesgos naturales, que servirá para determinar la situación de suelo rural, será incluido en el Informe de Sostenibilidad Ambiental, de conformidad con lo establecido en la vigente ley del suelo estatal "*para los instrumentos de ordenación de actuaciones de urbanización*".

La principal dificultad para gestionar los riesgos naturales radica en su carácter pluridisciplinar (Arana et al., 2017). Al ser la seguridad pública una competencia estatal, en este trabajo se abordan las diferentes normativas estatales que permiten la prevención y mitigación de los riesgos naturales bajo una perspectiva técnico-jurídica. Se hace especial hincapié en las inundaciones dado que existe un mayor desarrollo normativo al ser éstas las que producen mayores pérdidas socioeconómicas. Por otro lado, se presenta la inexistente transposición de la teoría legal a la práctica del planeamiento urbanístico.

2. PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS NATURALES

Para comprender cómo se pueden mitigar los riesgos naturales es necesario conocer algunos conceptos como peligrosidad, vulnerabilidad, exposición, períodos de retorno, mapas de peligrosidad y de riesgo. Dichos conceptos fueron definidos por primera vez en la normativa española en las directrices básicas de protección civil publicadas en 1995.

Así, en el art. 1.3 de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundación se definen los factores del riesgo. Así, la peligrosidad (P) es la *"Probabilidad de ocurrencia de una inundación, dentro de un período de tiempo determinado y en un área dada"*. La peligrosidad se puede expresar a partir del "*Período estadístico de retorno: Inverso de la probabilidad de que en un año se presente una avenida superior a un valor dado*". Un determinado peligro natural puede afectar a los elementos en riesgo: *"Población, edificaciones, obras de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos, elementos medio ambientales y otros usos del territorio que se encuentren en peligro en un área determinada"*. Aquellos que estén expuestos (E) al riesgo estarán caracterizados por una determinada vulnerabilidad (V): *"Grado de probabilidad de pérdida de un elemento en riesgo dado, expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total), que resulta de una inundación de características determinadas"*. El riesgo se define como el *"Número esperado de víctimas, daños materiales y desorganización de la actividad económica, subsiguientes a una inundación"*. El valor del Riesgo (R) es igual al producto de P x V x

E. Por tanto, la importancia de conocer los factores del riesgo (P,V,E) radica en que permiten valorar el riesgo. Si uno de ellos es cero, teóricamente no existiría riesgo para un determinado peligro natural.

La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundación ya se refería a los mapas de inundación y el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico se refería a los mapas de peligrosidad y riesgo establecidos en la Directiva 2007/60/CE, sobre evaluación y gestión del riesgo de inundación. Sin embargo, es el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación el que los define. Así dicho Real Decreto establece que los mapas de peligrosidad (art. 9), en los que se representará la "*extensión previsible de la inundación y calados del agua o nivel de agua*" aunque cuando se considere necesario se representarán "*caudales y/o velocidades máximas alcanzadas por la corriente en la zona inundable*", contemplarán diferentes probabilidades de ocurrencia o períodos de retorno (50, 100 ó 500 años). Además, en dichos mapas se representará también la "*delimitación de los cauces públicos y de las zonas de servidumbre y policía, la zona de flujo preferente en su caso, la delimitación de la zona de dominio público marítimo-terrestre*". Los mapas de riesgo (art. 10) incluirán, entre otras, la información siguiente para cada uno de los períodos de retorno establecidos "*número indicativo de habitantes que pueden verse afectados y tipo de actividad económica de la zona que puede verse afectada*". Estos mapas se integrarán en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables y serán la base de los planes de gestión del riesgo de inundación (art. 11). Por tanto, para elaborar los mapas de riesgo será necesario conocer no solo la peligrosidad sino también la vulnerabilidad y los elementos expuestos, por lo que su elaboración será más cara que la de los mapas de peligrosidad.

Una forma de prevenir los riesgos naturales será disminuyendo la peligrosidad, la vulnerabilidad o la exposición de los elementos en riesgo. A corto plazo, mediante la previsión meteorológica o hidrológica se podrá delimitar cuándo y dónde podrían producirse las inundaciones, mitigando los daños a través de los sistemas de alerta temprana y protocolos de evacuación. A largo plazo se podrá determinar además la probabilidad y la severidad de la inundación mediante los mapas de peligrosidad, lo que permitirá establecer planes de autoprotección y de emergencia. La legislación, planificación urbanística y la educación, así como la ejecución de medidas estructurales preventivas permitirán reducir disminuir dos o más de los factores de riesgo (fig. 2).

Mientras que el mundo de la ciencia se encarga de la predicción y de la propuesta de medidas de prevención, es el mundo del derecho y de las políticas públicas el que se encarga de la ejecución de dichas medidas preventivas, lo que complica que las propuestas técnicas se lleven a cabo. Las dificultades para coordinar a nivel estatal las labores a realizar por las diferentes Administraciones Publicas dificultan en gran manera la mitigación de los riesgos naturales. Así por ejemplo a nivel estatal existen varios ministerios que elaboran mapas de peligrosidad y riesgo (fig. 2): Educación y Formación Profesional (MEFP), Ciencia e Innovación (MCI), Transición Ecológica y Reto demográfico (MITECO), Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) y Ministerio del Interior.

Los conflictos de competencias entre los diferentes niveles administrativos no hacen más que incrementar el número de Administraciones Públicas que intervienen en la gestión del riesgo de desastres (Escartín, 2017). Así, mientras las competencias en protección civil son concurrentes y las de ordenación del territorio y urbanismo son autonómicas, las competencias en seguridad pública corresponden al estado.

2.1. De la teoría…

En España no existe una normativa específica sobre riesgos naturales por lo que las referencias a los mismos se encuentran dispersas en la legislación sectorial. Aunque los estudios del terreno, hidrológicos, sísmicos o geológicos se recogen en dicha normativa desde los años sesenta, no es hasta dos décadas después cuando se consideran en el planeamiento urbanístico. El hecho de que éste deba someterse a una evaluación ambiental estratégica implica que el marco jurídico de los riesgos naturales esté constituido por la legislación ambiental y la sectorial, principalmente del suelo, de aguas y de protección civil (Garrido, 2017).

Generalmente la normativa relacionada con los riesgos naturales se ha implementado después de algún desastre natural. Así después de las inundaciones de Cataluña y el País Vasco de 1982 y 1983 se promulgó la ley 2/1985, de 21 de enero, sobre protección civil, que establecía los planes territoriales y especiales (inundaciones, riesgos sísmico y volcánico). Después de las inundaciones de la Comunidad Valenciana y Andalucía Oriental, en 1987 y 1989, respectivamente, el RD 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la norma básica de protección civil estableció las directrices para la elaboración de los planes especiales de protección civil ante diferentes riesgos naturales. Dichos planes establecieron la identificación y análisis del riesgo, así como la evaluación de sus consecuencias y la zonificación del riesgo. Las directrices básicas de protección civil ante el riesgo de inundaciones, sísmico y volcánico se promulgaron en 1995 y 1996, mientras que la directriz básica ante el riesgo de maremotos se publicó en 2015 (fig. 3).

Por otro lado, la ley 29/1985 de aguas estableció unas limitaciones de usos en las zonas inundables. Dichas zonas fueron definidas en el Real Decreto 849/1986, sobre Reglamento de dominio público hidráulico.

Posteriormente, la inundación repentina del camping de Biescas y las inundaciones de Badajoz, que

produjeron 96 y 22 víctimas mortales en 1996 y 1997 respectivamente, impulsaron la consideración de los riesgos naturales en la planificación urbanística. Así, la Ley 6/1998 de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones (LSV) incluía por vez primera los artículos que contribuirían a la mitigación de los riesgos naturales a través de la ordenación territorial y urbanística, al considerar como suelos no urbanizables los sometidos a algún régimen especial de protección incompatible con su transformación "*de acuerdo con los planes de ordenación territorial o la legislación sectorial, en razón…de riesgos naturales acreditados en el planeamiento sectorial, o en función de su sujeción a limitaciones o servidumbres para la protección del dominio público*" (art. 9.1).

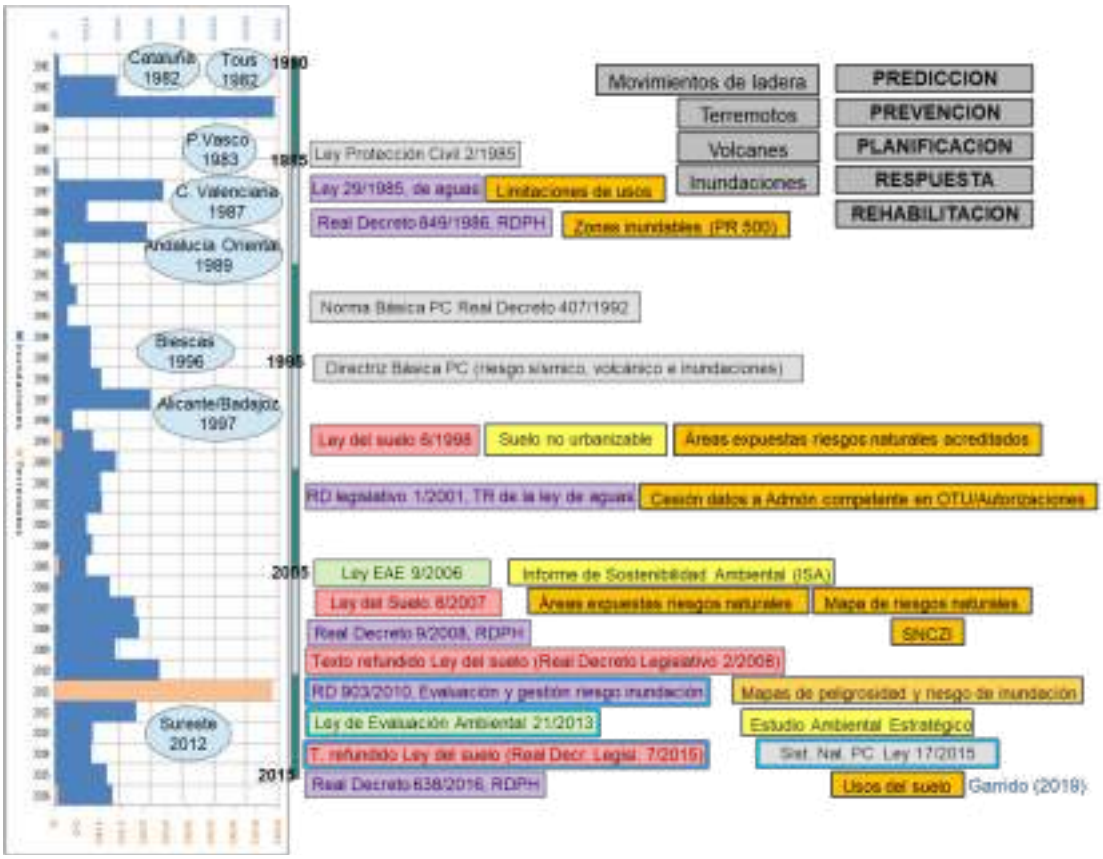


Figura 3. Legislación nacional más relevante relacionada con los riesgos naturales. Indemnizaciones pagadas por daños producidos por inundaciones y terremotos (a partir de datos del Consorcio de Compensación de Seguros, 2019), víctimas mortales (a partir de datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2018) y eventos al que están asociadas (modificado de Garrido, 2019).

La Ley 8/2007, de 28 de mayo, del suelo (LS07), y posteriormente el Real Decreto legislativo 2/2008, de 20 de junio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Suelo (TRLS08) establecieron que estaría en situación básica de suelo rural (no urbanizable en la LSV) aquél *"suelo preservado por la ordenación territorial y urbanística de su transformación mediante la urbanización, que deberá incluir, como mínimo, los terrenos excluidos de dicha transformación por la legislación de protección o policía del dominio público,… así como aquéllos con riesgos naturales o tecnológicos, incluidos los de inundación o de otros accidentes graves, y cuantos otros prevea la legislación de ordenación territorial o urbanística*" (art.12.2a).

La contribución de la Unión Europea en la prevención de riesgos naturales se pone de manifiesto en los esfuerzos que está realizando tanto a nivel de directivas, como la relativa a la Evaluación Ambiental Estratégica (Directiva 2001/42/CE) o la relativa a la evaluación y gestión del riesgo de

inundación (Directiva 2007/60/CE), y a nivel de normativa técnica, por ejemplo, los publicados a finales de los noventa, referidos al diseño geotécnico y sísmico (Eurocódigos 7 y 8).

La ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente (LEAE), que traspone la Directiva comunitaria 2001/42, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente establece la obligación de incorporar un Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA), denominado estudio ambiental estratégico (art. 20) en la vigente ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental que deroga la LEAE. La inclusión de dicho informe supuso que en la LS07 se estableciera por primera vez en una normativa urbanística la inclusión de un mapa de riesgos naturales del ámbito objeto de la actuación en el informe de sostenibilidad ambiental de los instrumentos de ordenación de actuaciones de urbanización (art. 15.2). Lo establecido en los citados artículos 12.2a y 15.2 de la LS07 se mantiene en el vigente Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana (TRLS15).

La Directiva 2007/60/EC sobre evaluación y gestión del riesgo de inundación supuso por un lado que se promulgara el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, para incorporar los criterios que establece dicha Directiva en lo que se refiere a las zonas inundables. Así, se plantea la elaboración de un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables que será tenido en cuenta por las administraciones con competencias sobre ordenación del territorio y planificación urbanística. Por otro lado, la Directiva se traspuso en el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que obliga a la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo de inundación, los cuales formarán parte de los planes de gestión del riesgo de inundación, que serán tenidos en cuenta por los instrumentos de ordenación territorial y urbanística.

Por otro lado, la Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil establece que se creará una Red Nacional de Información sobre Protección Civil, que contendrá entre otros un mapa nacional de riesgos de PC y un registro informatizado de los planes de protección civil. Además, establece que se creará una Red de Alerta Nacional de Protección Civil y un Fondo de Prevención de Emergencia, este último dotado con cargo a los Presupuestos Generales del Estado (PGE).

Entre las actividades preventivas financiadas están: el análisis de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgos o los mapas de riesgos de protección civil. Sin embargo, con cargo a los PGE del año 2019 se consignaron únicamente 180.000 euros, lo que hace difícil que el citado Fondo cumpla sus objetivos.



Figura 4. Limitaciones de usos del suelo según el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico. (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2017).

El Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico establece las limitaciones a los usos del suelo en las diferentes clases de suelo en las zonas de flujo preferente y en las zonas inundables (fig.4).

2.1.1. La importancia de los mapas de riesgos naturales en la prevención

El objetivo de los mapas de riesgos naturales es impedir la urbanización de aquellas áreas expuestas a los mismos, es decir, evitar la exposición de los elementos en riesgo y por consiguiente evitar el riesgo. Sin embargo, como puso de manifiesto el anteriormente citado Real Decreto 638/2016, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, en dichas áreas se establecerán limitaciones a los usos del suelo.

Sin embargo, la normativa del suelo no establece ni el tipo de mapa de riesgos naturales a utilizar, ni su escala, ni el nivel de riesgo. Evidentemente no es lo mismo un riesgo bajo que un riesgo alto. Mientras que el primero se podrá minimizar mediante la ejecución de medidas correctoras que disminuyan la peligrosidad o la vulnerabilidad, en el segundo caso el riesgo, una vez realizado el pertinente análisis coste-beneficio, será más complicado de reducir utilizando medidas correctoras.

La existencia de varios tipos de mapas de riesgos naturales (fig. 5) hace que la elección de uno u otro generalmente dependa de su coste económico. Así, es mucho más caro realizar mapas de riesgo que de peligrosidad, siendo los mapas inventario y los de susceptibilidad los más baratos. Mientras que estos últimos, al permitir una predicción espacial, son suficientes para clasificar el suelo como urbanizable o no urbanizable, los mapas de riesgo, que requieren previamente de los mapas de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición de los elementos en riesgo, deberían utilizarse principalmente en suelo urbano y para la planificación de la protección civil.

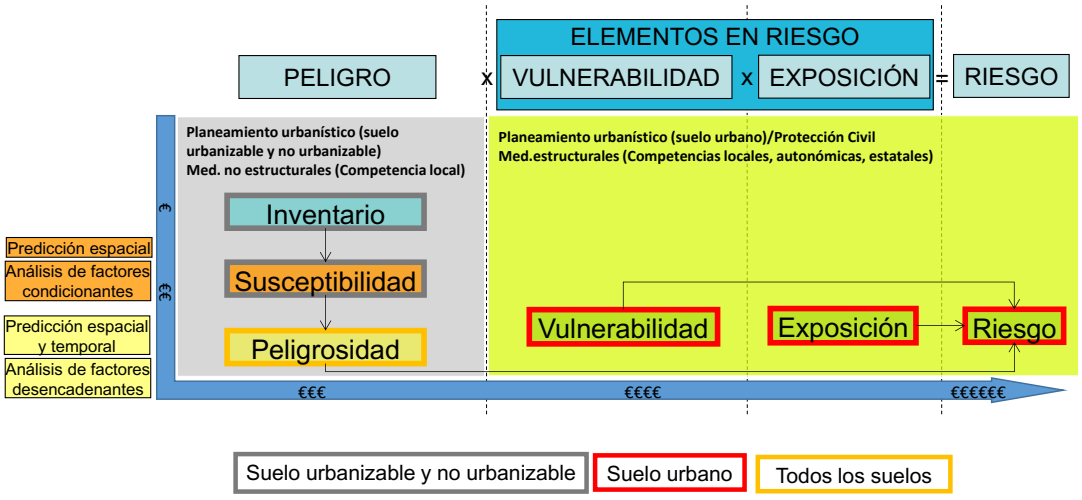


Figura 5. Mapas de riesgos naturales y su relación con los factores del riesgo, el planeamiento urbanístico y la protección civil.

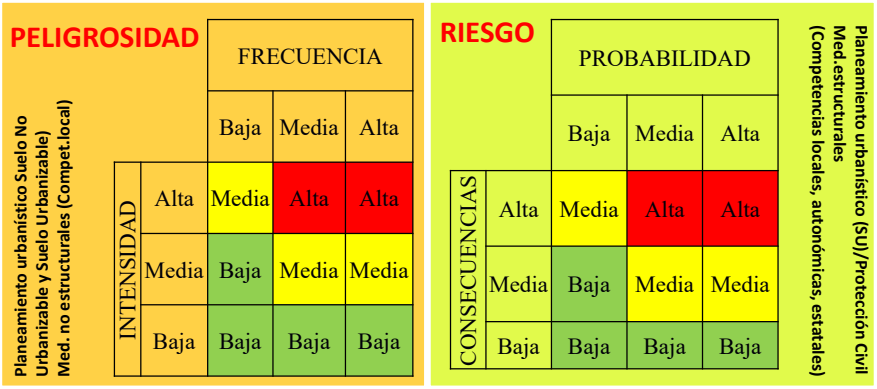
Para la realización de un mapa de susceptibilidad únicamente será necesario llevar a cabo un análisis de los factores condicionantes, mientras que para la realización de un mapa de peligrosidad será necesario analizar también los factores desencadenantes. Muchos de los desastres naturales son desencadenados por eventos naturales sobre los que será más difícil actuar ya que suelen ser de carácter puntual. Sin embargo, aquellos factores que condicionan la aparición de un desastre natural suelen prevalecer en el tiempo pudiendo ejecutarse medidas correctoras sobre ellos.

La existencia de diferentes metodologías para la realización de los mapas de riesgos naturales implica que los resultados obtenidos serán diferentes en función de la metodología utilizada. Díez–Herrero (2017) sugiere que la falta de normalización de las técnicas y métodos de análisis y representación de los mapas de peligrosidad y riesgo, así como el uso errático de los periodos de retorno en la legislación sectorial dan lugar a incertidumbres y fuentes de error.

Dado que las citadas metodologías aparecen publicadas en documentación técnica (Díez –Herrero et al., 2008; Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2011) no suelen tener carácter normativo, salvo que se incorporen al ordenamiento jurídico mediante una remisión normativa (Esteve, 2011), lo que contribuirá a una reducción de la discrecionalidad técnica.

Los mapas de riesgos permiten establecer una zonificación del territorio en función de su nivel de

peligrosidad/riesgo, lo que condicionará la clasificación del suelo y los usos del mismo. Así, en suelos de baja peligrosidad/riesgo los estudios de detalle deberían ser recomendados, así como las medidas estructurales, mientras que en los suelos de alta peligrosidad/riesgo tanto los estudios de detalle como las medidas estructurales deberían ser obligatorias (fig. 6).



	ESTUDIOS DE DETALLE	MEDIDAS ESTRUCTURALES
Baja	Recomendados	Recomendadas
Media	Altamente recomendados	Necesarias
Alta	Obligatorios	Obligatorias

Figura 6. Recomendaciones en función de los niveles de peligrosidad/riesgo.

Por otro lado, las autorizaciones para los proyectos de urbanización o de construcción estarán condicionadas por los niveles de riesgo. Aquellas obras con un nivel de riesgo aceptable serán autorizadas siempre, mientras que aquellas con un nivel de riesgo intolerable serán prohibidas siempre. Existirán niveles de riesgo en las que dichas autorizaciones establecerán una serie de restricciones, limitaciones o recomendaciones (fig. 7).

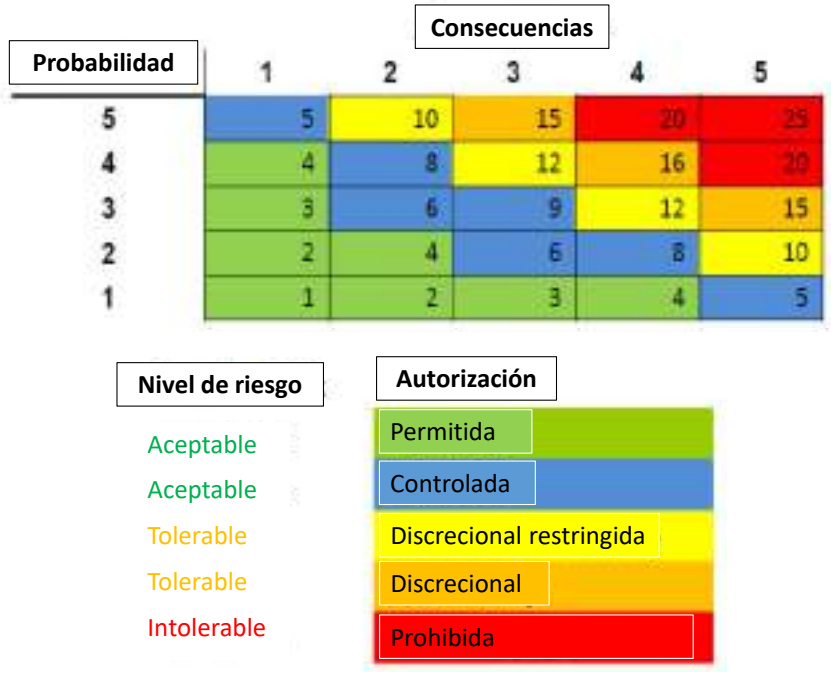


Figura 7. Tipos de autorizaciones de proyectos de urbanización y obras en función del nivel de riesgo. Fuente: Saunders y Kilvington, 2016.

Así, por ejemplo, el Plan Especial de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones de Cantabria (INUNCANT) zonifica el territorio en varios niveles de riesgo (alto, significativo y bajo) establecidos en función del periodo de retorno de las inundaciones, y de los posibles daños, de conformidad con la Directriz Básica de Inundaciones, sobre núcleos urbanos, viviendas aisladas, instalaciones comerciales e industriales y/o servicios básicos. Dichos daños se establecen en función de la altura de la lámina de agua (fig. 8).

Es evidente que este tipo de matriz de riesgo es muy útil en suelo urbano o para la planificación de la protección civil, sin embargo, el coste de los mapas de riesgo implica que su uso sea muy escaso, siendo preferible la utilización de los mapas de peligrosidad.

La utilidad de la zonificación del territorio a partir de los mapas de peligrosidad, susceptibilidad e incluso inventario permitiría establecer medidas correctoras que disminuyan la peligrosidad, la vulnerabilidad y/o la exposición de los elementos en riesgo.

RIESGO		CONSECUENCIA					
		Núcleos urbanos			Viviendas aisladas	Instalaciones Comerciales e Industriales y Servicios Básicos	
		Graves daños (h≥ 1,0 m)	Daños significativos (0,5<h ≤ 1,0)	Pequeños daños (0<h≤ 0,5)	Impacto (h≥ 0,50)	Daños Importantes/ Significativos (h ≥ 0,50)	Daños Pequeños (0< h < 0,5)
FRECUENCIA	T ≤ 50 AÑOS	ALTO (A-1 Frecuente)	ALTO	SIGNIFICATIVO	ALTO	ALTO	SIGNIFICATIVO
	50 < T ≤ 100 AÑOS	ALTO (A-2 Ocasional)	SIGNIFICATIVO	BAJO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	BAJO
	100 < T ≤ 500 AÑOS	ALTO (A-3 Excepcional)	SIGNIFICATIVO	BAJO	BAJO	SIGNIFICATIVO	BAJO

*h=altura de la lámina de agua en metros

Figura 8. Niveles de riesgo en función del período de retorno y de las consecuencias. Fuente: Plan Especial de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones de Cantabria, INUNCANT.

2.1.2. Los informes sectoriales

Los riesgos naturales también se pueden prevenir a partir de la utilización de los informes sectoriales preceptivos y vinculantes. Así, los informes de las Administraciones Hidrológica y de Costas sobre el dominio público hidráulico y el dominio público marítimo-terrestre, respectivamente, serán determinantes para el contenido de la memoria ambiental, aunque se podrá disentir de forma expresamente motivada (art.15.3), lo cual no se establece para el resto de informes sectoriales, como podrían ser los de protección civil. De acuerdo la normativa autonómica de protección civil y/o emergencias, en los instrumentos de ordenación territorial y urbanística se deberán recabar informes de protección civil sobre los riesgos. En Aragón, Baleares, Castilla-León, La Rioja y Navarra dichos informes serán vinculantes, mientras que en Cantabria y País Vasco serán preceptivos, aunque en Cataluña y Galicia serán facultativos. Los mapas de riesgos, una vez incorporados a la memoria ambiental, serían vinculantes ya que han pasado el trámite de información pública. Además, si dichos mapas no fueran vinculantes, no existiría ninguna herramienta que permitiera conocer las áreas expuestas a riesgos, por lo que no podría cumplirse el art. 12.2a LS07 y el suelo estaría en situación de urbanizado, aunque estuviera en una zona de riesgos naturales.

2.2. …a la práctica. La planificación urbanística

La legislación vigente es en teoría suficiente para la prevención de los riesgos naturales, aunque a la

vista de las pérdidas socioeconómicas que se están produciendo da la impresión que dicha normativa no es adecuada. Sin embargo, cuando se analiza cómo se está aplicando la legislación en el planeamiento urbanístico se observa que la misma se incumple sistemáticamente, por lo que no es un problema de falta de normativa, sino de su incumplimiento.

Aproximadamente el 35% y el 25% del planeamiento urbanístico general de los municipios con más de 20.000 y de 100.000 habitantes, respectivamente, es anterior a 1998. Es importante destacar que los planes generales de ordenación urbana (PGOU) de los 63 municipios españoles de más de 100.000 habitantes (donde vive el 40% de la población española) aprobados con posterioridad al año 2007, es decir, aquellos que tenían la obligación de incluir un mapa de riesgos naturales y de clasificar el suelo como no urbanizable, son 16 y solo representan el 8 % de la población española. Los últimos PGOU aprobados han sido los de Santa Cruz de Tenerife y Burgos en 2014 y el de Castellón de la Plana en 2015. De los 405 municipios con más de 20.000 habitantes, donde reside aproximadamente el 70% de la población española, solo 114 tienen aprobado un planeamiento con posterioridad a 2007, lo que representa el 16% de la población española (Jiménez-Renedo, 2020). Por tanto, el planeamiento se renueva a un ritmo muy inferior al de la normativa lo que impide aplicar las mejoras establecidas en la misma para la mitigación de los riesgos naturales.

Una vez analizados los PGOU aprobados con posterioridad a 2007 correspondientes a las capitales de provincia y a los municipios con más de 100.000 habitantes se observa que la mayoría no incluye ningún tipo de mapa de riesgos naturales. Cuando lo incluye se confunden los mapas de peligrosidad con los de riesgo o no se consideran todos los peligros a los que está expuestos el municipio (fig. 9) y, como cabría imaginar por motivos económicos y/o políticos, ningún municipio tiene en cuenta el mapa de riesgos para clasificar el suelo ni para establecer limitaciones o restricciones a los usos del suelo (Garrido, 2014). Sorprende que solo puntualmente, como en Burgos, se consideren los planes de protección civil de ámbito municipal (inundaciones, sísmico…) en el PGOU.

El motivo de su falta de consideración puede ser que la mayoría de los municipios españoles no los han realizado pese a que son obligatorios desde hace más de 25 años (Garrido y Egea, 2016).

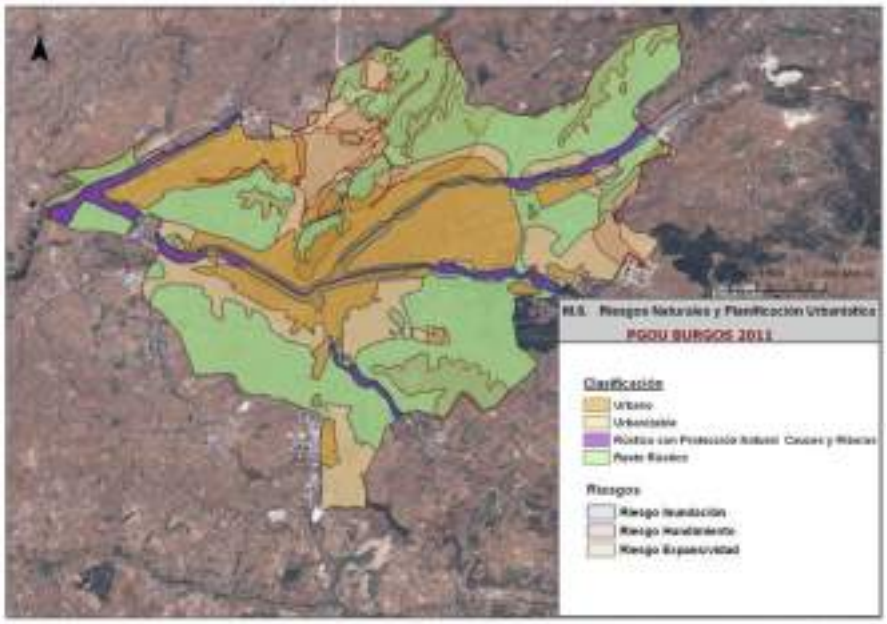


Figura 9. Mapa de clasificación del suelo y mapas de riesgos naturales incluidos en el PGOU de Burgos.

En muchos municipios existe una categoría específica de suelo no urbanizable (SNU) en el que se engloban determinados peligros naturales. Esta categoría generalmente hace referencia al riesgo de inundación. Sin embargo, cuando se superponen los mapas de riesgos naturales con los planos de clasificación del suelo se observa que no todas las áreas expuestas al riesgo están clasificadas como dicho suelo no urbanizable de prevención de riesgos. Así, para el caso de las inundaciones, se observa que gran parte de las áreas inundables se clasifican como suelo urbano o urbanizable en lugar de como SNU de especial protección por riesgos. Por ejemplo, en Alicante el SNU de especial protección por riesgo de inundación (incluyendo el SNU de especial protección por cauces y ramblas), incluye zonas que no aparecen como inundables ni en el mapa de riesgos ni en el SNCZI. Así, solo el 26% de las zonas inundables del mapa de riesgos están incluidas en dicha categoría de suelo, mientras que otro 29% y otro 23% de dichas zonas están incluidas en el suelo urbano y urbanizable, respectivamente. Más del 75% del suelo no urbanizable de especial protección por riesgo de inundación no tienen ningún riesgo significativo. Pese a ello, solo un 6% del suelo urbano y un 13% del suelo urbanizable están expuestas al riesgo de inundación (figura 10).

Generalmente no se utilizan mapas de riesgos naturales publicados previamente por diferentes organismos e instituciones, aunque hay algunas excepciones (Garrido, 2014). En ocasiones la utilización de escalas diferentes a las del planeamiento urbanístico hacen que los mapas de riesgos no deban ser utilizados ya los planos de ordenación suelen ser más detallados que la cartografía de riesgos.

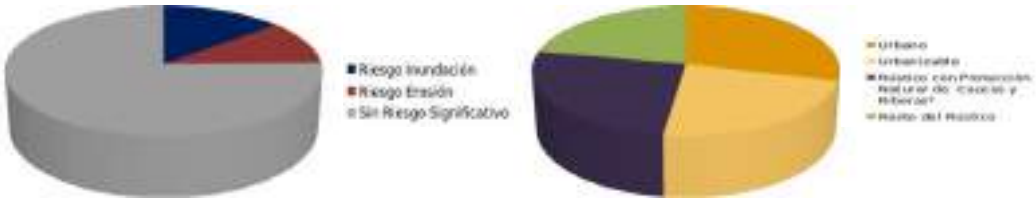


Figura 10. Alicante. SNU de especial protección por riesgo de inundación (izq.) y riesgo de Inundación (der). Fuente: elaboración propia.

Como se puso de manifiesto anteriormente, otra dificultad surge de la utilización de metodologías diferentes que da lugar a cartografías que son similares, pero no idénticas. Así, cuando se superpone la cartografía de riesgos naturales a la cartografía del SNCZI se observa que dichas cartografías no coinciden (fig. 11). En el PGOU de Gijón, por ejemplo, el mapa de riesgos diferencia entre la inundación fluvial y la de cuencas torrenciales. El SNCZI no recoge éstas últimas, por lo que en ese sentido el mapa de riesgos es más completo. La inundación fluvial coincide bastante bien con la del SNCZI, aunque de los tres ríos que desembocan en el mar, el central no aparece recogido en el mapa de riesgos, y tampoco los tramos más próximos al mar. El motivo de ese "error" probablemente se entiende cuando se superpone el SNU de especial protección de cuencas fluviales al SNCZI. El riesgo de inundación del mapa de riesgos no es tenido en cuenta en el suelo urbanizable, y probablemente el citado "error" se deba a que el riesgo se producía en zona urbana, por lo que el mapa de riesgos solo se tiene en cuenta fuera de los suelos urbano y urbanizable (Garrido, 2014).

La mayoría de los municipios analizados no utilizan la cartografía de zonas inundables incluida en el SNCZI pese a que ésta se ajusta bastante bien a las zonas realmente inundadas en los últimos años (Roselló, 2019). Así, a modo de ejemplo, en la fig. 12 se observa como la inundación de octubre de 2018, en Sant Llorenç des Cardassar coincide con las zonas inundables del SNCZI.

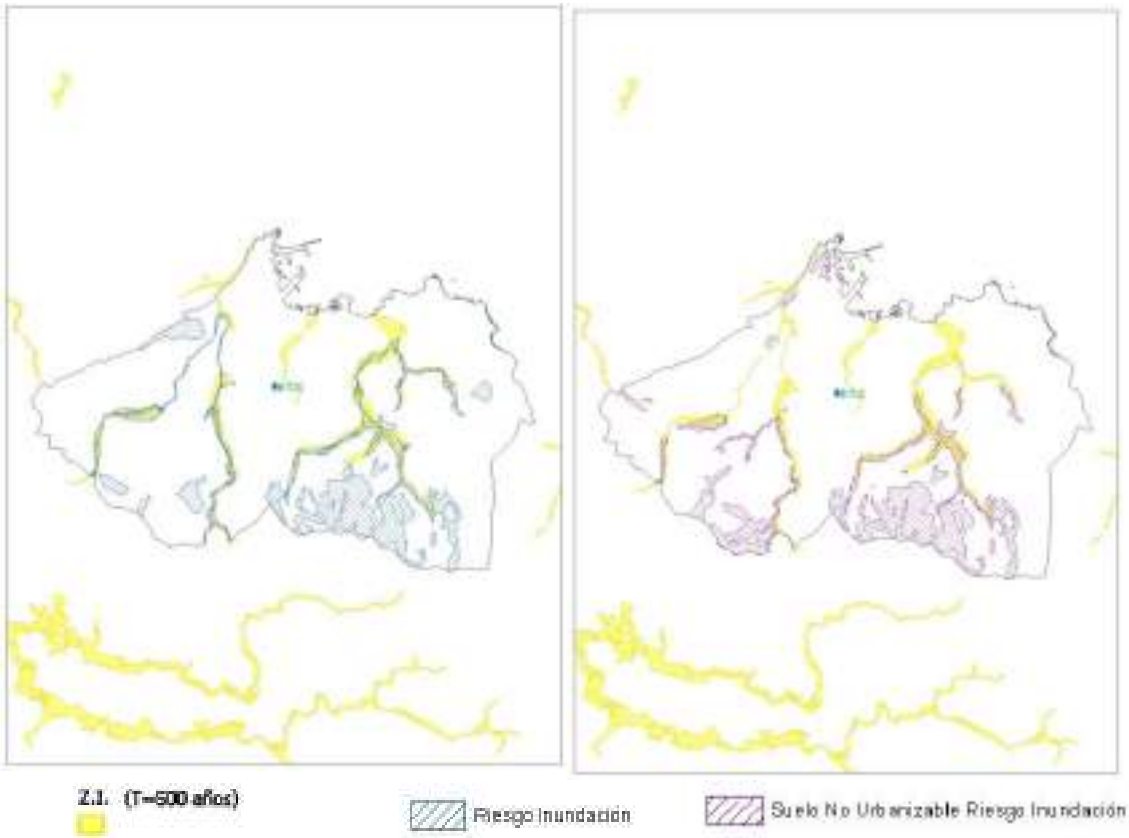


Figura 11. Zonas inundables para un período de retorno de 500 años (del SNCZI), las zonas inundables (del mapa de riesgos de inundación del PGOU) y el SNU con riesgo de inundación (del plano de clasificación del suelo del PGOU) en el municipio de Gijón. Fuente: Garrido, 2014.

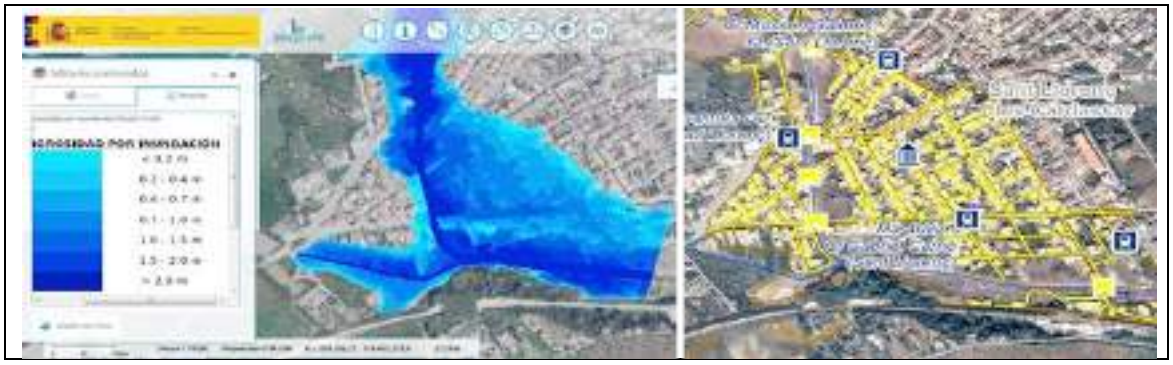


Figura 12. Izquierda. Zonas inundables para un período de retorno de 500 años (del SNCZI). Derecha. Zonas inundadas (de https://emergency.copernicus.eu) en Sant Llorenç des Cardassar

El Dominio Público Hidráulico y el Dominio Público Marítimo-Terrestre han sido considerados en todos los municipios con ríos y/o costas, respectivamente, probablemente debido a la obligatoriedad de considerar en el planeamiento urbanístico los informes sectoriales de la Administración de aguas y de costas. Probablemente ese sea el motivo por el que el mapa de riesgo de inundación (aunque generalmente es de peligrosidad) es el que se incluye en mayor medida en el PGOU.

Sin embargo, pese a que en cualquier territorio el riesgo geotécnico está presente en mayor o menor medida, son escasos los municipios donde se contempla ese riesgo. Por otro lado, en los municipios con mapas de riesgos geotécnicos la variabilidad de éstos es enorme: rellenos antrópicos,

expansividad, subsidencias, hundimientos, suelos blandos, karstificación o presencia de yesos. Asimismo, la mayoría de los municipios obligados a estudiar el riesgo sísmico no incluyen en su PGOU ningún tipo de cartografía de peligrosidad sísmica ni ningún mapa de microzonación sísmica.

En fase de proyecto es obligatorio, de conformidad con la Ley de Ordenación de la Edificación, realizar un estudio geotécnico, según lo establecido en el Código Técnico de la Edificación (DBSE-Cimientos). En determinados municipios españoles es obligatorio cumplir la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSR). Puede que este sea el motivo por el que no se contemplan mapas de riesgos geotécnicos ni sísmicos en la mayoría de los municipios. Sin embargo, ello implica que el territorio no se estará zonificando en función de los niveles de peligrosidad y por tanto la Administración estará incumpliendo lo establecido en la normativa del suelo y trasladando parcialmente su responsabilidad al promotor.

Los mapas de riesgos volcánicos, de tsunamis o asociados a la dinámica litoral tampoco se suelen incluir en el documento ambiental del PGOU.

Los mapas de movimientos del terreno suelen referirse a laderas naturales y en algunos casos se refieren a determinados tipo de movimientos (deslizamientos, desprendimientos…) en otros casos se refieren a movimientos de ladera.

Por otro lado, la utilización de cartografías previamente publicadas por diferentes instituciones públicas y la publicación en plataformas públicas de cartografías de riesgos naturales realizadas por investigadores de Universidades con cargo a proyectos financiados con fondos públicos permitiría la utilización de mapas contrastados, en este último caso debido a que normalmente suelen publicarse en revista científicas internacionales con revisión de pares. El principal problema para su utilización surge de la dificultad que tienen los actores que intervienen en la elaboración del planeamiento urbanístico para acceder a los artículos donde esas cartografías están publicadas (Garrido y Saunders, 2019).

Por último, la revisión por pares de las cartografías incluidas en el estudio ambiental del planeamiento urbanístico, entre los que se incluiría a las Administraciones competentes en la realización de cartografías de riesgos naturales, permitiría que los Ayuntamientos dispusieran de mapas de riesgos naturales contrastados.

3. RESPONSABILIDAD Y FUERZA MAYOR

Generalmente la responsabilidad es la piedra angular para la prevención de los riesgos naturales. Las precauciones tomadas por los diferentes actores involucrados en el planeamiento urbanístico serían muy diferentes si conocieran las consecuencias de sus decisiones. Generalmente los conflictos de competencias entre las diferentes Administraciones Públicas permiten diluir las responsabilidades.

Para poder imputar la responsabilidad por riesgos naturales a un sujeto es necesario establecer previamente en la legislación aquellos umbrales por debajo de los cuales el daño pueda ser soportado por el ciudadano, es decir, habría que determinar legalmente el riesgo inaceptable y el tolerable. La dificultad radica en establecer el límite entre ambos. Los técnicos utilizan el factor de seguridad o los períodos de retorno para determinar si se pueden producir daños. Generalmente se utiliza un único factor de seguridad para determinar la posible existencia de riesgo geotécnico o la estabilidad de un talud natural o antrópico. Sin embargo, para el riesgo de inundación o el sísmico se utilizan diferentes períodos de retorno los cuales permiten determinar los niveles de peligrosidad y por tanto el riesgo tolerable o inaceptable. Dichos factores de seguridad y períodos de retorno deben ser establecidos en la normativa.

En algunas ocasiones se alega la fuerza mayor para eximir de responsabilidad a las Administraciones Públicas y a los particulares en caso de desastres naturales, pese a que prácticamente nunca se cumplen los requisitos de imprevisibilidad o inevitabilidad para alegar la misma, por lo que siempre se podrá imputar la responsabilidad a una persona física o jurídica.

Por un lado, se podría alegar que el evento catastrófico es imprevisible. Sin embargo las áreas expuestas a riesgos naturales se pueden conocer utilizando para ello mapas inventario y de susceptibilidad, al permitir éstos una predicción espacial. Asimismo, se podrían utilizar los mapas de peligrosidad y de riesgo, al permitir éstos no solo una predicción espacial sino también una predicción temporal. Por tanto, solo podría alegarse la imprevisibilidad si los mapas de riesgos naturales no se hubieran realizado o si estos mapas no detectaran las zonas inundables. En este último caso habría que determinar si las condiciones del entorno han variado desde que se realizó el mapa y el mapa no se ha actualizado o si realmente el mapa no está bien elaborado.

En este último caso la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental establecía que el autor o autores del documento ambiental estratégico, cuya calidad y exhaustividad serán las necesarias para cumplir con las exigencias de la ley, será responsable del contenido y fiabilidad de los estudios y documento ambientales que haya realizado, salvo en lo que se refiere a los datos recibidos de la Administración de forma fehaciente (art. 16). Es importante destacar que dicha ley también establece que los autores de dichos documentos tendrán la capacidad técnica suficiente de conformidad con las normas sobre cualificaciones profesionales y de la educación superior y deberán estar identificados indicando su titulación, y en su caso, profesión regulada.

Por otro lado, se podría alegar que la catástrofe natural es irresistible o inevitable. Sin embargo, la misma se podría evitar bien a través de medidas estructurales como de medidas no estructurales. En el primer caso es probable que exista un conflicto de competencias entre los diferentes niveles administrativos lo que diluirá las responsabilidades, sin embargo, en el segundo caso las competencias, que suelen ser municipales, permitirían imputar la responsabilidad en el ámbito local.

Si los mapas de riesgos naturales no se han elaborado/actualizado o no se han utilizado para zonificar, clasificar y calificar el territorio la responsabilidad será de la Administración, cuyo deber es prevenir los riesgos naturales (Conde, 2017). Si los mapas no están bien elaborados la responsabilidad será del técnico que los realizó. Es importante determinar el origen de los daños y las pérdidas para poder imputar la responsabilidad correctamente.
La falta de aplicación de la normativa que ayude a reducir uno o varios de los factores de riesgo implicará una responsabilidad de la Administración. Si los informes técnicos realizados al amparo de la NCSR, la delimitación del DPH o del DPMT, o la realización de los mapas de riesgos naturales no es correcta se podrá imputar la responsabilidad a los técnicos.

Por último, señalar que la declaración responsable “en la que el promotor exprese claramente que conoce y asume el riesgo existente y las medidas de protección civil aplicables al caso, comprometiéndose a trasladar esa información a los posibles afectados, con independencia de las medidas complementarias que estime oportuno adoptar para su protección” establecida en el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, parece un intento de eximir de responsabilidad a la Administración.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar de que la normativa estatal española relacionada con los riesgos naturales es adecuada para la prevención de los mismos, el incumplimiento sistemático de la misma impide disminuir las pérdidas socioeconómicas asociadas. En cualquier caso tanto la normativa estatal como la autonómica

deberían implementarse para superar algunas deficiencias técnicas (períodos de retorno, escalas, actualización de los mapas de riesgos naturales, metodologías…) eliminando aquellos conceptos jurídicos indeterminados que causan inseguridad jurídica.

La legislación del suelo, directamente o a través de la legislación sectorial, y los instrumentos de planeamiento urbanístico permiten disminuir principalmente: la exposición, por ejemplo, vía Ley de Costas o Ley de Aguas, y la vulnerabilidad, por ejemplo, vía Código Técnico de la Edificación o Norma de Construcción Sismorresistente.

La coordinación entre las legislaciones citadas y los instrumentos previstos en ellas es clave para la prevención y mitigación de los riesgos naturales (Menéndez-Rexach, 2016).

El anteproyecto de la Ley de Impulso para la sostenibilidad del territorio de Andalucía repite alguno de los errores de la Ley 6/1998 de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones, en relación a la prevención de los riesgos naturales. La derogación de algunas normativas autonómicas del suelo ha supuesto también un paso atrás. Por este motivo se propone el siguiente articulado para las futuras legislaciones, autonómicas o estatales, del suelo o de evaluación ambiental:

1. *"El estudio de evaluación ambiental estratégica de los instrumentos de ordenación urbanística general y de desarrollo contendrá un mapa de peligrosidad de al menos los siguientes peligros naturales: geotécnicos (suelos colapsables, suelos expansivos…) y movimientos del terreno (laderas naturales, subsidencias,…), tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Además, si fuera necesario incluirá un mapa de peligrosidad de inundaciones fluviales (en el que se delimitará la zona de flujo preferente) y/o costeras, y si fuera obligatorio según la NCSR, se incluirá también un mapa de peligrosidad sísmica y otro de microzonación sísmica, en el que se considerará la licuefacción. A partir de dichos mapas se zonificará el territorio en al menos 5 niveles de peligrosidad, lo que permitirá establecer la clasificación y calificación del suelo, y por tanto los usos del mismo.*

Los períodos de retorno a utilizar serán los establecidos en la normativa sectorial vigente.

En las normas urbanísticas de cada instrumento de ordenación urbanística se establecerán las medidas correctoras a ejecutar, cuyo diseño se concretará en los proyectos de urbanización y de construcción, así como las recomendaciones y/o limitaciones pertinentes en las áreas expuestas a riesgos naturales.

Todos los mapas se realizarán en formato digital, compatible con un Sistema de información Geográfica, a la misma escala que los planos de ordenación correspondientes, y se actualizarán cada 5 años.

Para una peligrosidad muy alta o alta se clasificará el suelo como no urbanizable (rústico) preservado por existencia de procesos naturales susceptibles de generar riesgos, mientras que para una peligrosidad media o baja se permitirán actuaciones de nueva urbanización siempre que en el proyecto de urbanización se incluya un estudio y cartografía de los peligros naturales anteriormente citados, a la misma escala que la de los planos del proyecto.

Por otro lado, los proyectos de urbanización y de construcción incluirán un estudio de estabilidad de las excavaciones y rellenos, en condiciones estáticas y cuando fuera necesario en condiciones dinámicas, así como las medidas correctoras a ejecutar para mitigar aquellos peligros naturales a los que estén expuestos los suelos a urbanizar, y aquellos suelos no urbanizables (rústicos) en los que su aprovechamiento requiera de las mismas. Además, cualquier obra deberá cumplir con los requerimientos establecidos en el Código Técnico de la Edificación (DBSE-Cimientos) y en la Norma

de Construcción Sismorresistente en vigor. Todos los mapas se realizarán en formato digital, compatible con un Sistema de información Geográfica".

Las limitaciones a los usos de suelo en la zona de flujo preferente y en las zonas inundables serán las establecidas en el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico"

2. "En relación con los riesgos naturales en la fase de consultas sobre los instrumentos de ordenación de actuaciones de urbanización, deberán recabarse al menos los siguientes informes, cuando sean preceptivos y no hubieran sido ya emitidos e incorporados al expediente ni deban emitirse en una fase posterior del procedimiento de conformidad con su legislación reguladora:
a) El de la Administración hidrológica, en su caso, sobre la protección del dominio público hidráulico, zonas de flujo preferente y zonas inundables.
b) El de la Administración de costas, en su caso, sobre la protección del dominio público marítimo-terrestre y las zonas inundables.
c) Los de las Administraciones e instituciones competentes en materia de prevención y gestión de riesgos naturales, como protección civil o el Instituto Geológico y Minero de España.

Los informes a los que se refiere este apartado serán determinantes para el contenido de la memoria ambiental, que solo podrá disentir de ellos de forma expresamente motivada".

3. "El estudio y cartografía de riesgos naturales deberá ser realizado por profesionales con la capacidad técnica suficiente y con experiencia profesional acreditada, indicando la/s persona/s que han analizado cada uno de los riesgos naturales. Los autores deberán estar identificados indicando su titulación, y en su caso, profesión regulada, siendo responsables del contenido y fiabilidad de los estudios y documento ambientales que haya realizado lo que permitirá imputar responsabilidades en caso de que fuera necesario".

4. "Se considerará infracción grave la falta de mapas de peligrosidad en suelos no urbanizables (rústicos) y a urbanizar y de mapas de riesgo en los suelos urbanos. Asimismo, se considerará infracción grave la no utilización de dichos mapas para la clasificación y calificación del suelo, así como la falta de recomendaciones, restricciones y limitaciones a los usos del suelo en la normativa urbanística."

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado con cargo al proyecto DER2017-87789-R, financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la sociedad (Ministerio de Economía y Competitividad) y por el grupo de investigación de la Junta de Andalucía (RNM-374).

REFERENCIAS

- Arana, E., Conde, J. Garrido, J. y Navarro, A. (2017). *Riesgos naturales y derecho. Una perspectiva interdisciplinar*. Dykinson, Madrid.
- Conde, J. (2015). La responsabilidad de la Administración por daños derivados de fenómenos naturales: especial referencia al riesgo de inundación. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 45, 67-100.
- Consorcio de Compensación de Seguros (2019). *Estadística. Riesgos extraordinarios: 1971-2018*.
- Díez-Herrero, A., Lain, L. y Llorente, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e*

inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

- Díez-Herrero, A. (2017). Mapas de peligrosidad y riesgo por inundaciones, implicaciones técnicas y jurídicas. En: E. Arana, J. Conde, J. Garrido y A. Navarro (Coord.), *Riesgos naturales y derecho. Una perspectiva interdisciplinar*. Dykinson, Madrid.
- Escartín, V. (2017). Sobre la ordenación urbanística de los terrenos inundables tras la aprobación del real decreto 638/2016. En: E. Arana, J. Conde, J. Garrido y A. Navarro (Coord.), *Riesgos naturales y derecho. Una perspectiva interdisciplinar*. Dykinson, Madrid.
- Esteve, J. (2011). *Lecciones de Derecho Administrativo*. Marcial Pons, Madrid.
- Garrido, J. (2014). *Prevención de riesgos naturales y geotécnicos a través de la legislación sectorial y la ordenación territorial y urbanística. La Evaluación Ambiental Estratégica y los riesgos en la planificación urbanística española*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Garrido, J. (2017). La prevención de los riesgos naturales: marco normativo y su aplicación en el planeamiento urbanístico. En: E. Arana, J. Conde, J. Garrido y A. Navarro, *Riesgos naturales y derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 115-164. Dykinson, Madrid.
- Garrido, J. (2019). Is the Spanish legislation suitable for preventing natural hazards?. En: M. J. Amérigo, J. A. García, R. Gaspar y S. Luís, S, *Interdisciplinarity in practice and in research on society and the environment: Joint paths towards risk analysis* (Proceedings of the SRA-E-Iberian Conference, SRA-E-I). Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. Colección Jornadas y Congresos, 20.
- Garrido, J. y Egea, J. (2016). *La prevención de los riesgos naturales en la legislación del suelo y de protección civil*. IX Congreso Geológico de España, Huelva.
- Garrido, J. y Saunders, W. S. A. (2019). Disaster Risk Reduction and Land Use Planning: Opportunities to Improve Practice. En: A. Shakoor y K. Cato (Eds.), *Geologic Hazards: Earthquakes, Land Subsidence, Coastal Hazards, and Emergency Response*, 161-165. Springer, Heidelberg.
- Jiménez-Renedo, María C. (2020). Planeamiento urbanístico en los municipios de más de 20.000 habitantes. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales* (CyTET), S.l., 847-856.
- Menéndez, A. (2016). El Derecho de aguas ante las situaciones hidrológicas extremas: inundaciones y sequías. En: T.M. Navarro (Dir), *Desafíos del derecho de aguas. Variables jurídicas, económicas, ambientales y de Derecho comparado,* 85-142. Thomson Reuters Aranzadi.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2018). *Perfil Ambiental de España 2017*.
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables*.
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (2017). *Los usos en las zonas inundables: directiva de inundaciones, ley de aguas y reglamento del dominio público hidráulico*.
- Olcina, J. (2007). *Riesgo de inundación y ordenación del territorio en España*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Roselló, F. (2019). Modelos de inundación del Sistema Nacional de Cartografía de zonas inundables vs. inundaciones reales. *Consorseguros Digital*, 11.
- Saunders, W. S. A. y Kilvington, M. (2016). Innovative land use planning for natural hazard risk reduction: A consequence-driven approach from New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 18,* 244-255.

EL FORO FUERZA VEGA BAJA: NECESIDADES Y POSIBILIDADES DE FINANCIACIÓN

Armando Ortuño Padilla
Universidad de Alicante
arorpa@ua.es

Santiago Folgueral Moreno
Arvum Consultoría & Proyectos, S.L.

Fabio Amorós Fructuoso
Arvum Consultoría & Proyectos, S.L.

RESUMEN

En esta ponencia se recoge el papel del Foro *Fuerza Vega Baja* en defensa de los intereses de la comarca de la Vega Baja para disminuir el estructural riesgo de inundación y los graves daños acontecidos a lo largo de los siglos en esta tierra. Así mismo, se incluyen una serie de propuestas a tal efecto y posibles fórmulas de financiación. En primer lugar, se describe someramente el "Foro Fuerza Vega Baja": miembros, finalidad, reivindicaciones, etc. Seguidamente, se recoge una referencia histórica a los episodios de inundaciones en la Vega Baja con especial hincapié en lo acontecido durante las últimas décadas. A continuación, se relata el episodio de la última DANA en base a la información oficial disponible. A partir de esa información se esbozan algunas propuestas ya recogidas en documentos anteriores elaborados por la propia Confederación Hidrográfica del Segura o la Generalitat Valenciana además de otras motivadas por los últimos acontecimientos. Finalmente, se recogen los instrumentos de financiación europea a los que cabría recurrir tanto para la ejecución de las obras como para mejorar la gestión de riesgos desde una perspectiva social.

1. EL FORO *FUERZA VEGA BAJA*

El Foro *Fuerza Vega Baja* nació el 1 de octubre a los pocos días del episodio de la DANA que asoló la comarca. No obstante, es oportuno señalar que su constitución estaba prevista en el propio mes de septiembre con anterioridad a la DANA, por lo que ésta no hizo más que demostrar la utilidad y necesidad que el tejido socioeconómico había detectado.

Tal cual reza en el Memorándum de constitución del Foro, la comarca de la Vega Baja está compuesta de 27 municipios con una población que ronda los 350.000 habitantes (7,06% regional) y una extensión de 957 km^2 (4,12% regional), lo que supone una densidad de 365 hab/km^2, cifra que se corresponde con 1,5 veces la media de la Comunidad Valenciana. Más allá de la densidad de población de la comarca, hay que destacar su crecimiento poblacional que, en el periodo 1999-2019, se ha incrementado desde 215.000 habitantes hasta los 350.000 anteriormente citados.

Ello provoca la necesidad de contemplar y acometer de forma inmediata actuaciones en materia de movilidad sostenible, infraestructuras y transportes que doten a la comarca de la Vega Baja de los recursos necesarios en aras al crecimiento económico, competitividad, empleabilidad y bienestar social que tan necesarios resultan para los habitantes de los 27 municipios que conforman este área

metropolitana, actuaciones que no pueden demorarse más en su ejecución y que tantas veces se vienen reivindicando desde todos los sectores sociales de nuestro territorio.
Entre las infraestructuras y otro tipo de actuaciones recogidas en el Memorándum, se recogen las hidráulicas de la siguiente forma:

> *Ejecución de las infraestructuras necesarias e inaplazables para garantizar una respuesta adecuada a la gestión de las carencias hidráulicas, a las que se enfrenta la comarca. Especial mención a la DANA de septiembre de 2019. Realización de estudios y proyectos de las obras hídricas necesarias a impulsar desde los ayuntamientos de la Comarca.*

Como miembros fundadores del Foro figuran, entre otros, los alcaldes de los 27 municipios, entidades como las Cámaras de Comercio de Orihuela y Alicante, Asemvega, CEV, AVE, ASAJA, PROVIA, INECA, FECOREVA, Juzgados privativos de aguas, etc. además de empresas como Caja Rural Central o TM.

2. ANTECEDENTES Y PRIMERAS REFLEXIONES RESPECTO DE LA DANA DE 2019 Y LA VEGA BAJA

La cuenca hidrográfica del Segura cuenta con una superficie de 14.936,4 km^2, una longitud total del río Segura de 325,1 km y un desnivel de 2.081 m (Ezcurra, 2007). Se caracteriza por un régimen irregular de caudales que origina grandes inundaciones y daños materiales y personales en las Vegas de regadío.

Particularmente, en el tramo final del río Segura desde Murcia hasta Guardamar, el cauce discurre en algunas zonas a media ladera, particularidad que provoca que, frente a las inundaciones, se produzcan situaciones críticas debido a que las aguas desbordadas no vuelvan al cauce del río, sino que se dirijan en dirección al punto más bajo del valle.

Este hecho se ha comprobado en las lluvias de septiembre de 2019, cuando la rotura de la mota del río a la altura de Almoradí derivó un gran caudal del cauce principal que no volvió al mismo, inundando los municipios que se encontraban a menor cota en su camino hacia el mar.



Figura 1. Cauce del río Segura a su paso por Almoradí en el punto de la rotura. Se aprecian los trabajos de reparación de la mota. Fuente: EFE.

La Confederación Hidrográfica del Segura dispone de una recopilación histórica de inundaciones y precipitaciones extremas registradas en esta cuenca que, aun no siendo un inventario exhaustivo, recoge episodios desde el siglo XIII hasta el año 2012, destacando en la historia reciente las siguientes (se han añadido los episodios de 2016 y 2019):

- Riada de Santa Teresa, 15/10/1879: esta riada es una de las más recordadas en la cuenca debido a los grandes daños generados. A raíz de la misma, se desarrolló el "Proyecto de Obras de Defensa Contra las Inundaciones en el Valle del Segura" redactado por los ingenieros Ramón García y Luis Gaztelu en 1886, que constituyó el primer Plan Global de defensa contra las avenidas que se hizo en España.
- Avenida de Puerto Lumbreras, 20/10/1973: esta avenida se produjo en la rambla de Nogalte y en los ríos Guadalentín, Mula y Segura, así como en las ramblas de Cartagena. La rambla de Nogalte alcanzó un caudal de 2.000 m^3/s, arrasando parte de Puerto Lumbreras. El río Segura se desbordó en numerosos puntos, siendo uno de ellos la Vega Baja y asolando la huerta de Orihuela. Esta avenida, junto otras de menor intensidad producidas en la década de los setenta, dieron lugar al Plan General de Defensa Contra Avenidas de la cuenca del Segura de 1977, redactado por el ingeniero D. José Bautista Martín.
- 19/10/1982: Inundaciones destacables en la cuenca del río Segura, si bien el fenómeno más recordado es el derrumbamiento de la presa de Tous. Tras estas inundaciones, se impulsó el Programa General de Seguridad de Presas del Estado de 1983, iniciándose el desarrollo de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH), lo que permitió disponer de un sistema de telemedida, telecontrol y centralización de ciertos parámetros hidráulicos y meteorológicos en tiempo real. El desarrollo de este sistema se inició en 1984 y su construcción finalizó en 1992, siendo la avenida del 30 de noviembre de 1997 la primera controlada a través de este sistema.
- Lluvias del 25/07/1986 y 12/10/1986: dos episodios de lluvia intensos, afectando el primero principalmente a la zona de Jumilla, mientras que, en el segundo, el río Segura se desbordó a la altura del Raal y Alquerías antes de su llegada a Orihuela.
- Lluvias del 3/11/1987: temporal que afectó a la totalidad de la cuenca, generándose inundaciones generalizadas en las Vegas Media y Baja del Segura, alcanzando estas afecciones a la zona costera. Tras estas lluvias, de carácter extraordinario, se aprobó el Real Decreto-ley 4/1987, de 13 de noviembre, por el que se adoptan medidas urgentes para reparar los daños causados por las inundaciones ocurridas en la Comunidad Autónoma Valenciana y en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. (BOE nº 273, de 14 de noviembre de 1987, páginas 33963 a 33966), en el cual se indicaba en el Artículo 7º que *"1. Se autoriza al Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo para que ejecute, con las anualidades que se determinen por acuerdos del Consejo de Ministros, las actuaciones necesarias para la regulación de la cuenca del Júcar y la ejecución del plan de defensas en la cuenca del Segura. […]"* Es decir, se autorizaron las anualidades para las actuaciones necesarias del Plan de Defensas de la cuenca del Segura, por lo que pasa a denominarse Plan de Defensa Contra Avenidas de la Cuenca del Segura de 1987.
  Este Plan contemplaba la construcción de encauzamientos tanto del río Guadalentín como del río Segura, así como de una serie de presas para laminar las avenidas. El objetivo general era aumentar la capacidad del cauce del río Segura y disponer de las medidas necesarias para que evitar que las avenidas puedan superar el caudal máximo que admitiría la nueva sección del cauce.
- Precipitaciones del 30/09/1997: intensas precipitaciones en Alicante (270 mm en 6 horas) y que también afectaron a Murcia y Valencia. Durante este episodio, se comprobó (Ezcurra, 2007) la eficacia de las actuaciones del Plan de Defensa de 1987, ya que los caudales no retenidos por las presas de laminación, que alcanzaron puntas de 400 m^3/s, *"habría producido*

inevitablemente el desbordamiento del río Segura a su paso por la Vega Media, cuya capacidad no superaba los 150 a 160 m³/s, antes de construir el nuevo encauzamiento del Segura." Por otro lado, si no se hubiera ampliado el desvío del Paretón de Totana, el Guadalentín habría sumado caudales al río Segura, resultando inviable que el encauzamiento existente en la Vega Baja hubiera admitido estos aportes sin desbordarse. Tal y como se aprecia en la Figura 2, las precipitaciones más intensas se produjeron en la cabecera del río Segura y no afectaron a la Vega Baja. La distribución de precipitaciones registrada fue la siguiente:

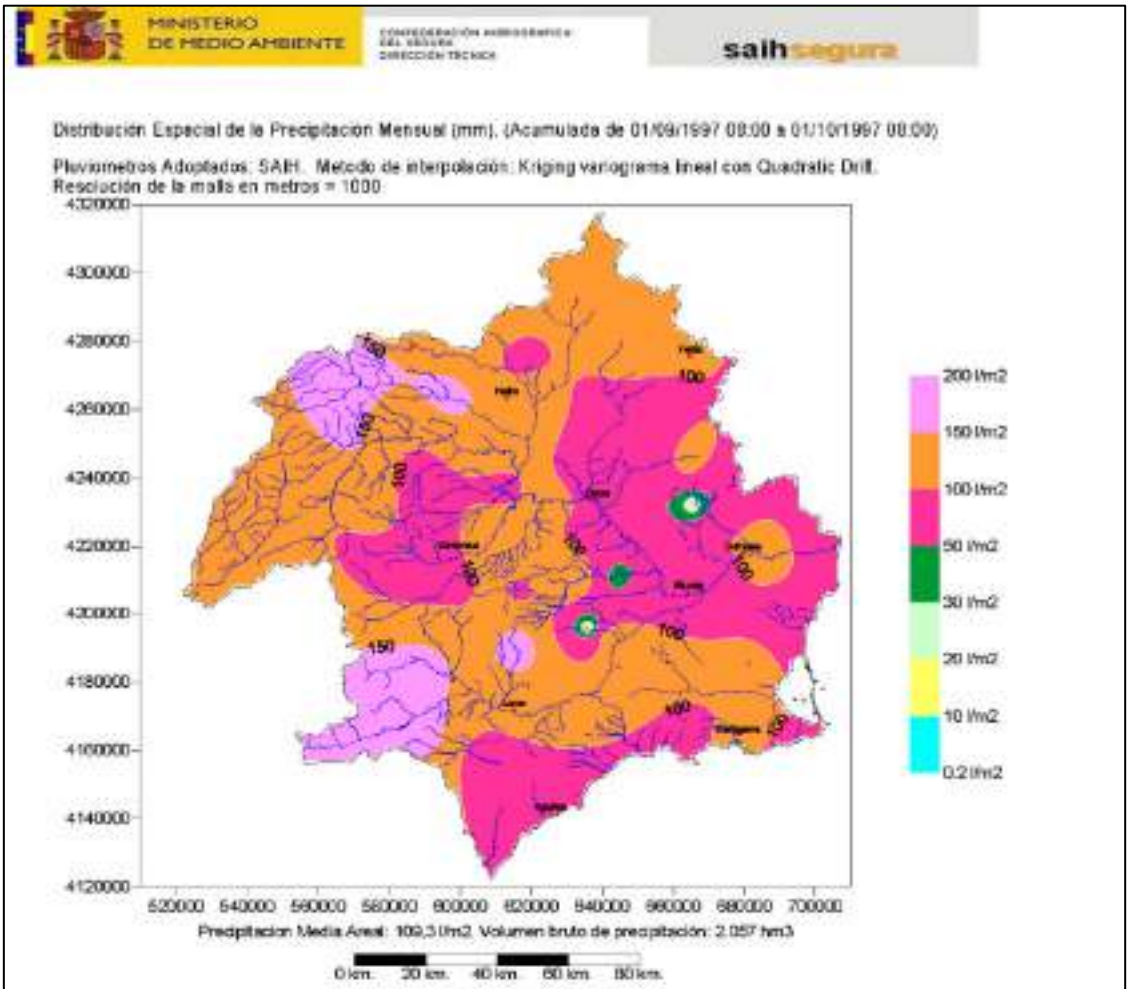


Figura 2. Distribución Espacial de la Precipitación mensual (mm), entre el 1 de septiembre de 1997 y el 1 de octubre de 1997. Fuente: SAIH Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.

- Riada de San Wenceslao 28/09/2012: dieron lugar a grandes caudales en los cauces de cabecera del Guadalentín, Nogalte y Canales. El embalse de Puentes recibió caudales que superaron los 2.000 m³/s, almacenando en un día 12,8 hm³. El embalse de Valdeinfierno recibió un aporte de 4,6 hm³. A su paso por Puerto Lumbreras, la rambla de Nogalte alcanzó la práctica totalidad de la capacidad del cauce.

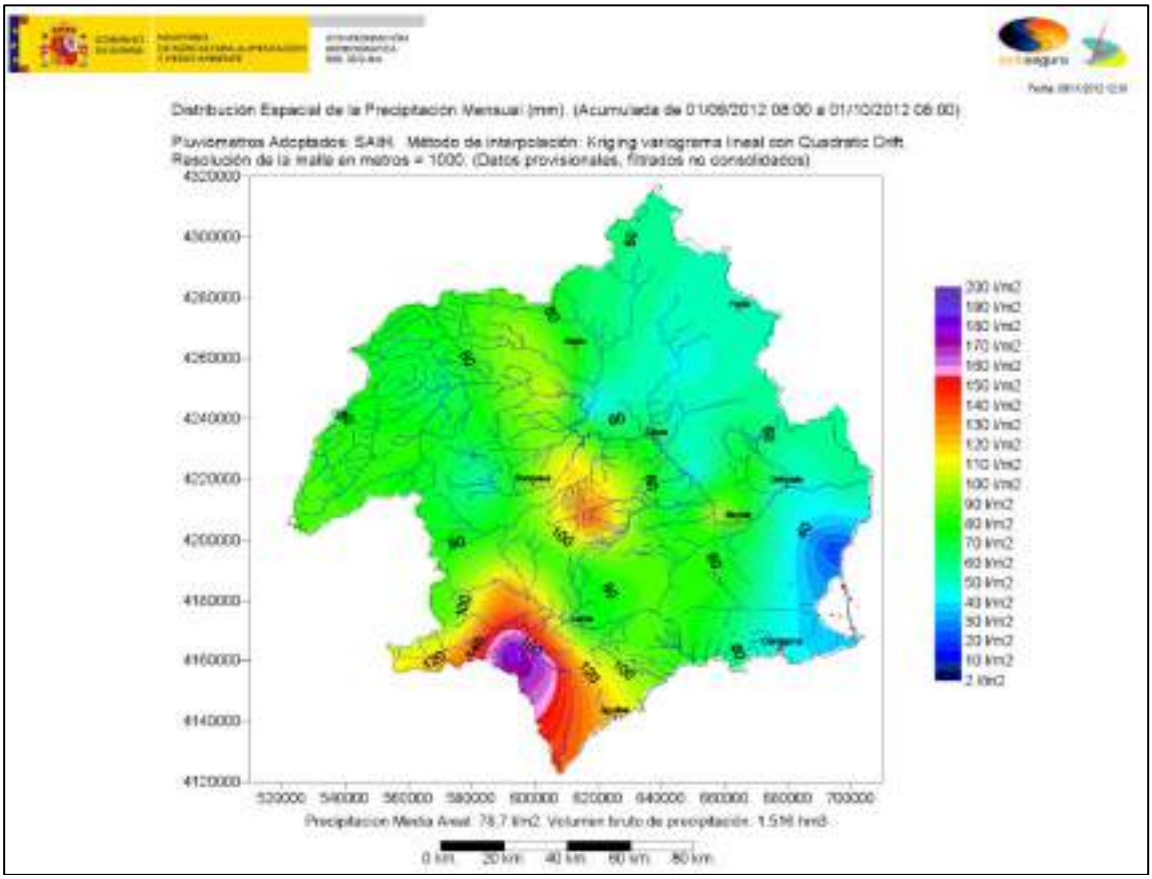


Figura 3. Distribución Espacial de la Precipitación mensual (mm), entre el 1 de septiembre de 2012 y el 1 de octubre de 2012. Fuente: SAIH Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.

En la Figura 3 se puede apreciar que las precipitaciones más intensas se produjeron en la cabecera de la cuenca, no afectando a la Vega Baja. Es importante destacar que la ampliación del canal del Paretón de Totana hasta los 1.200 m^3/s permitió minimizar las aguas que llegaban desde el Guadalentín al río Segura, por lo que esta obra ha contribuido a que estas lluvias no causaran daños en la Vega Baja.

- Diciembre de 2016: intensas lluvias que dieron lugar a una crecida del río Segura que llenaron el cauce a su paso por Murcia y Orihuela, desbordándose en este último.

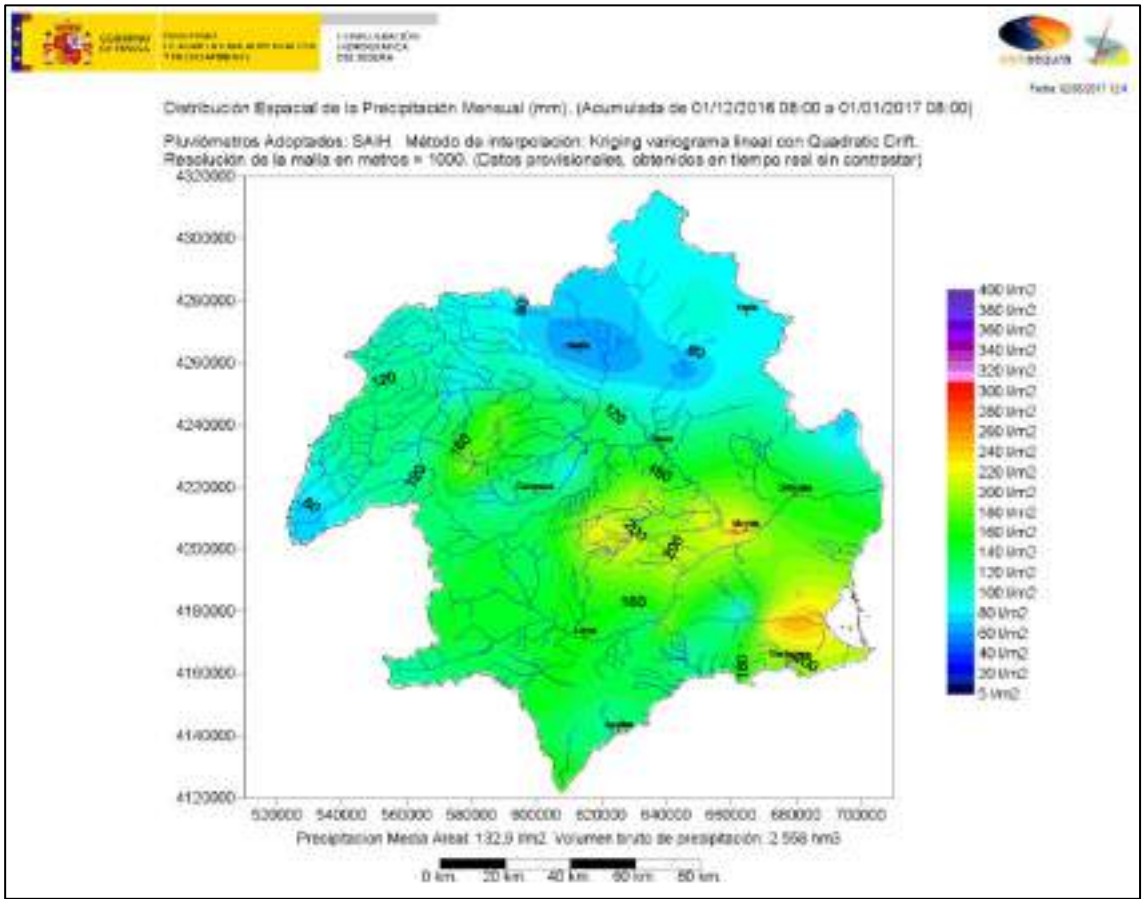


Figura 4. Distribución Espacial de la Precipitación mensual (mm), entre el 1 de diciembre de 2016 y el 1 de enero de 2017.Fuente: SAIH Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.

Se aprecia que las precipitaciones más intensas se produjeron sobre Murcia y la Vega Media del Segura, es decir, aguas abajo de las obras de laminación que se han construido para su protección. Este provocó desbordamientos en la Vega Baja ya que aguas debajo de las precipitaciones más intensas apenas se dispone de sistemas de laminación de la avenida.

- Inundación de Santa María, del 10 al 14 de septiembre de 2019: este episodio, de magnitudes extraordinarias, ha dado lugar al registro de 6 récords de precipitación en 24 horas del sureste peninsular, registrando 521 litros por metro cuadrado en Orihuela (Alicante) entre el 10 y el 14 de septiembre, concretamente se alcanzaron 497,6 litros en 48 horas. Este fenómeno ha resultado excepcional hasta el punto de no existir precedentes similares en, al menos, 100 años en la Vega Baja del Segura.

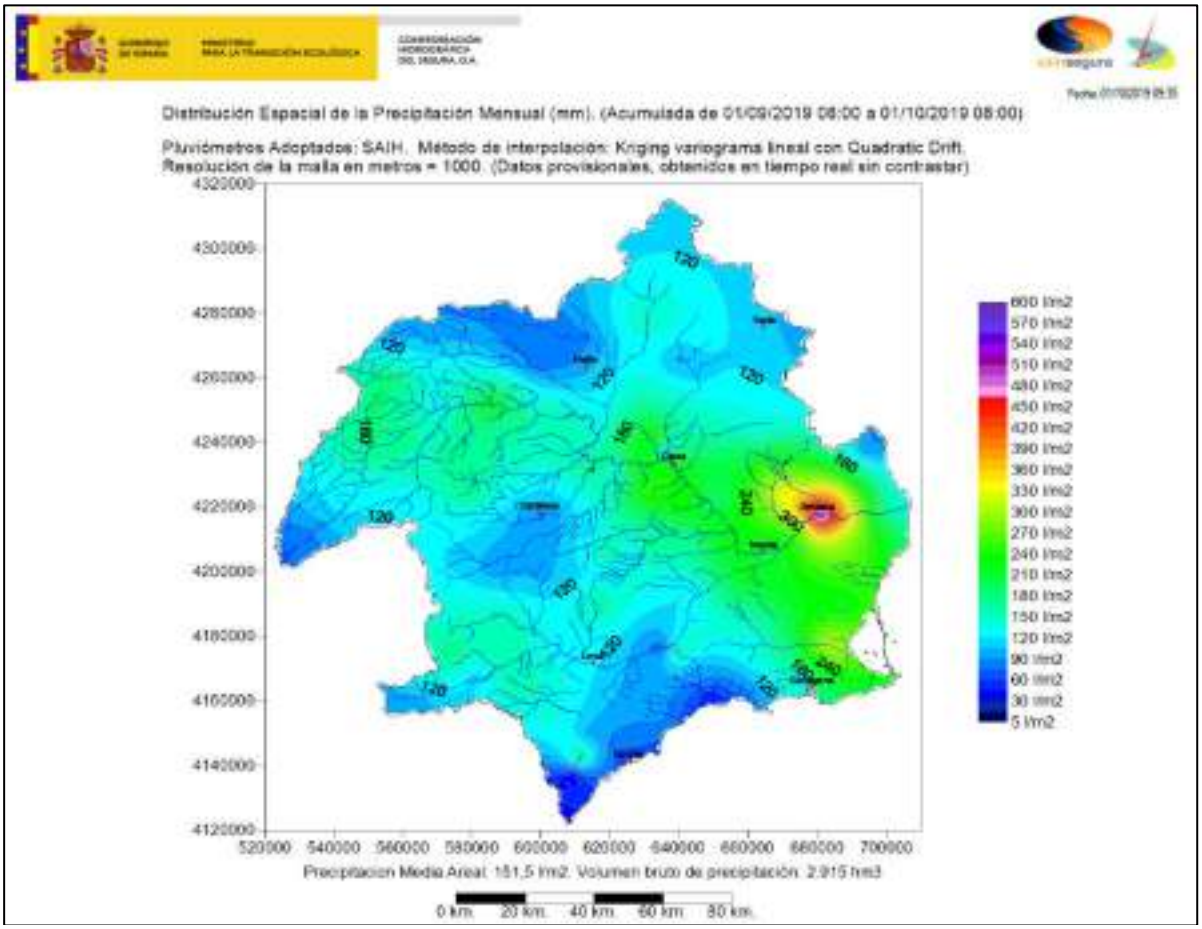


Figura 5. Distribución Espacial de la Precipitación mensual (mm), entre el 1 de septiembre de 2019 y el 1 de octubre de 2019. Fuente: SAIH Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.

Al igual que en las precipitaciones de diciembre de 2016, las lluvias de septiembre de 2019 se concentraron en los tramos finales de la cuenca del río Segura, es decir, aguas abajo de los sistemas de laminación de avenidas más relevantes, lo que dio lugar a inundaciones generalizadas en la Vega Baja del Segura.

Como conclusión a estos antecedentes, puede afirmarse que las inundaciones han formado parte de la historia del río Segura, por lo que históricamente se han llevado a cabo actuaciones enfocadas a la protección frente a las mismas, destacando aquellas que han tenido lugar de forma posterior a la riada de Santa Teresa, la cual dio pie a la redacción del "Proyecto de Obras de Defensa Contra las Inundaciones en el Valle del Segura" y, de forma reciente, el "Plan de Defensa contra Avenidas de 1987", con el que se aumentó la capacidad de laminación de la cuenca mediante la construcción de presas de laminación y de un encauzamiento desde Contraparada (Murcia) hasta la desembocadura en Guardamar del Segura (Alicante), logrando que la cuenca presente un buen comportamiento en la Vega Baja frente a precipitaciones que tienen lugar en la parte alta de la cuenca, como las acontecidas en 1997 y 2012.

Ahora bien, cuando se producen lluvias importantes en los tramos finales de la cuenca, casos de 2016 y, especialmente en 2019, estas precipitaciones pueden dan lugar a severas inundaciones puesto que en este espacio apenas se carece de actuaciones que puedan protegerlo.

Así mismo, también cabría preguntarse qué habría ocurrido si la tormenta de septiembre de 2019 se hubiera concentrado en la zona costera, altamente antropizada y con flujos de agua independientes del cauce del río Segura.

3. DANA SEPTIEMBRE 2019

Una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) es un fenómeno meteorológico que se define, según el Instituto Nacional de Meteorología, de la siguiente manera:

> *Depresión Aislada de Niveles Altos originada por el aislamiento de un ramal del chorro, polar o subtropical, que posee un movimiento completamente independiente del flujo que lo generó. Desde el punto de vista del Vórtice circumpolar, una DANA es una zona bien definida, persistente, desgajada y aislada de dicho Vórtice, situada en latitudes más bajas y que posee un desplazamiento propio e independiente del flujo de los oestes.*

Como se puede comprobar, el concepto de DANA está asociado a una perturbación atmosférica, pero no a los efectos que pueda llevar asociada, como las lluvias intensas. En cualquier caso, una DANA es uno de los mecanismos atmosféricos que puede unir los ingredientes necesarios para generar intensas lluvias torrenciales.

En el caso que nos ocupa, a última hora del 9 de septiembre de 2019 una DANA alcanzó la península y se fue desplazando hacia el sureste peninsular, desencadenando fuertes lluvias que se concentraron entre los días 12 y 14 de septiembre, dañando notablemente el sureste peninsular en general y, en particular, la Vega Baja del Segura.

3.1. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos asociados a este fenómeno atmosférico fueron los siguientes:

- En la Vega Baja del Segura, entre la mañana del día 12 y la del día 13, se acumuló el equivalente a la lluvia de un año.
- Se registraron 6 récords de precipitación en 24 horas en estaciones del sureste peninsular.
- Se superaron los 400 l/m^2 en, al menos, 6 estaciones de la Comunidad Valenciana y los 100 l/m^2 en, como mínimo, 47 estaciones de Aemet.
- Entre el 10 y el 14 de septiembre, en Gaianes (ubicado al norte de la provincia de Alicante) se alcanzaron los 482,8 l/m^2 y, en Orihuela, los 521 l/m^2.

3.2. Análisis de los flujos producidos mediante el SAIH de la CHS

El SAIH-Segura es el Sistema Automático de Información Hidrológica gestionado por la Confederación Hidrográfica del Segura que permite disponer de un mejor conocimiento del ciclo hidrológico y de los fenómenos hidrometeorológicos ocurridos en esta cuenca.
Este sistema permite apoyar a la toma de decisiones en situaciones extraordinarias de avenidas, por lo que se van a exponer los datos recopilados durante este episodio.

Para el caso que ocupa, se dispone de las siguientes estaciones:

- 01A03Q01 Caudal Río Segura Murcia (Autovía)
- 07C03Q08 Caudal Río Segura aguas abajo Sifón Orihuela
- 07A06Q01 Caudal Río Segura Orihuela
- 07R03Q01 Caudal río Segura Manzano y Ferrer
- 07R04Q01 Caudal Río Segura EA (Benejúzar)
- 07A04Q01 Caudal Río Segura EA Rojales

Los caudales registrados en estas estaciones entre el 9 y 25 de septiembre de 2019 fueron los siguientes:



Figura 6. Datos registrados en la estación del Río Segura en Murcia. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.



Figura 7. Datos registrados en la estación del Río Segura en Orihuela, a la altura del sifón del Trasvase. Como se aprecia, dejó de tomar datos el día 13/09/2019 y volvió a tomarlos el 15/09/2019. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.



Figura 8. Datos registrados en la estación del Río Segura en Orihuela. Como se observa, dejó de tomar datos el día 13/09/2019. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.



Figura 935. Datos registrados en la estación del Río Segura en el puente de Manzano y Ferrer. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.



Figura 10. Datos registrados en la estación del Río Segura en Benejúzar. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.



Figura 11. Datos registrados en la estación del Río Segura en Rojales. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, O.A.

Como se observa, el caudal que figura en el aforo de Rojales ofrece un máximo de 125 m^3/s. De la observación directa del nivel en el puente de Rojales durante la crecida se comprobó que el nivel estaba muy alto, a unos 15 cm de cubrir completamente los ojos del puente, lo que hace pensar en que la capacidad del cauce, salvo error de medida o calibrado, dista mucho de los 400 m^3/s que proponía el Plan de Defensa contra Inundaciones de 1987. Ello induce a pensar que, o bien los aforos no están bien calibrados, o es necesario revisar los cálculos hidráulicos (Dirección General del Agua, G.V., 2020).

Como se aprecia, los caudales punta han sido decrecientes desde Murcia hasta el puente de Manzano y Ferrer, es decir, se ha laminado la avenida, con caudales punta menores, pero con mayor duración en el tiempo. Este es el efecto esperado con la laminación de la avenida. En Benejúzar, se aprecia un incremento del caudal que necesariamente debe haberse añadido al cauce, como el procedente del azarbe mayor de Hurchillo (el caudal máximo que registró fue de 13 m^3/s cuando dejó de contar, aparentemente porque es la cifra máxima que puede registrar).

Finalmente, aunque no existen referencias directas en la rambla de Abanilla, de acuerdo con la modelización hidrológica realizada, se alcanzó un caudal de 1.410,2 m^3/s, mientras que, a través de observación directa en el azud de Benferri, se estimó un caudal de 1.255 m^3/s, por lo que parece corroborarse que el caudal superó los 1.000 m^3/s (Dirección General del Agua, G.V., 2020).

En la siguiente figura se aprecia el flujo de la rambla de Abanilla, desviado por la CV-930 hacia el casco urbano de Orihuela:

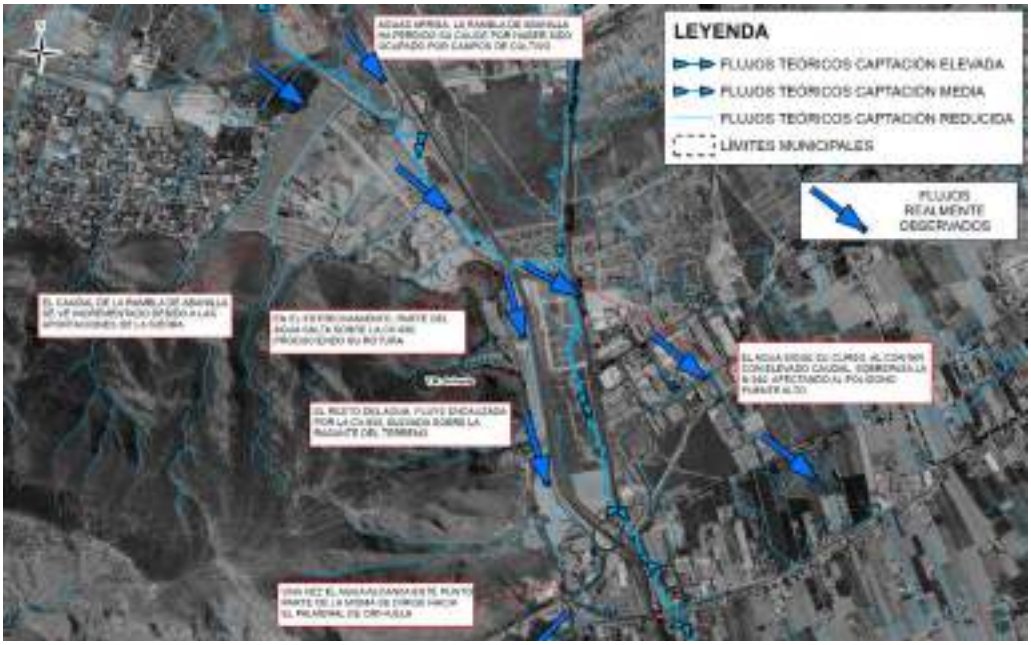


Figura 12. Esquema del comportamiento de los flujos asociados a la rambla de Abanilla. Fuente: elaboración propia a partir de PNOA, cedido por Instituto Geográfico Nacional ©.

3.3. Vista satélite de los flujos: el caso del entorno de Dolores

Copérnico es un programa de observación de la Tierra que ofrece información precisa, actualizada y de fácil acceso. Esta iniciativa está liderada por la Comisión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea.

Dentro de este programa, se encuentran dos satélites de la misión Sentinel 2, los cuales toman imágenes de alta resolución de la superficie terrestre, ofreciendo una imagen cada 5 días de todas las superficies terrestres.
Mediante estos satélites se pueden visualizar los intensos flujos de agua fuera de los cauces que han generado graves daños sobre las construcciones y cultivos, además de las afecciones sociales agravadas por el lento drenaje de las aguas en dirección al mar.
Para ilustrar estos impactos se ha escogido el casco urbano de Dolores y se muestran 4 vistas de satélite para mostrar el proceso seco-mojado-seco. En la primera imagen, del 3 de septiembre, se aprecia el estado inicial, previo a las precipitaciones. Las zonas anegadas, que se corresponden con las superficies más bajas, se observan en tonalidades notablemente oscuras en la imagen del 18 de septiembre.

En las dos fechas posteriores a la DANA, y hasta un mes después de las lluvias, se aprecia el proceso de secado con la desaparición progresiva de las tonalidades verdes, lo que demuestra los graves daños asociados a la agricultura.



03/09/2019 (previo a la inundación)



18/09/2019 (durante la inundación)



28/09/2019 (tras la retirada del agua)



13/10/2019 (tras la retirada del agua)

Figura 13. Vistas de satélite para mostrar el proceso seco-mojado-seco.
Fuente: Proyecto Copernicus, Satélites Sentinel-2

4. AVANCE DE ALTERNATIVAS DE ACTUACIONES CON CARÁCTER GENERAL

De acuerdo con los epígrafes anteriores y a falta de un estudio de mucho más profundo del funcionamiento de la cuenca, entre otras, se ha partido de la siguiente documentación para avanzar en las potenciales medidas destinadas a incrementar la resiliencia de la Vega Baja:

- "Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica del Segura" aprobado por Real Decreto 1/2016 de 8 de enero (BOE de 19 de enero de 2016). Concretamente, en su Anejo 10, relativo al Programa de Medidas, se incluyen una serie de medidas entre las que se encuentran las destinadas a la "Defensa contra avenidas".
- "Proyecto de Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura" correspondiente al período 2015-2021, y aprobado mediante Real Decreto 18/2016, de 15 de enero publicado el 22 de enero de 2016.
- El "Plan de Acción Territorial de Riesgos de Inundación de la Comunidad Valenciana" (PATRICOVA) de 2002 es uno de los instrumentos de ordenación del territorio previsto en la Ley 6/1989 de Ordenación del Territorio de la Comunidad Valenciana. En el Documento nº 2 se incluye el Programa de Actuaciones y, entre ellas, se encuentra la codificada como "EAC25", denominada "Plan Integral del río Segura (PIRS)".
- "Estudio sobre el estado de riesgo de la Vega Baja del río Segura frente a inundaciones provocadas por fuertes lluvias y la necesidad de realizar un plan de Infraestructuras hidráulicas. Propuesta de soluciones: análisis Dana septiembre 2019", elaborado por la Dirección General del Agua de la Consellería de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica de la Generalitat Valenciana y publicado en enero de 2020.
- Avance del "Plan Vega Baja Renhace", elaborado por la Generalitat Valenciana.

Esas posibles actuaciones son las siguientes:

- Canal aliviadero del río Segura al Reguerón de Hurchillo (by-pass Orihuela).
- Ensanchamiento del cauce del río Segura desde el final del by-pass de Orihuela hasta la desembocadura.
- Ligado a lo anterior, y puesto que existe una limitación del caudal en el casco urbano de Rojales, sería necesario ejecutar un by-pass en esta localidad.
- Rambla de Abanilla:
    - Actuaciones de laminación de las aguas de escorrentía como pequeñas presas, repoblación forestal o aterrazamientos.
    - Encauzamiento de las aguas a su llegada al término municipal de Orihuela.
    - Analizar el destino de este posible encauzamiento para que no empeore la situación del cauce del río Segura.
- Sistemas de intercepción y canalización de las escorrentías que proceden de la Sierra de Orihuela.
- Encauzamiento de las Ramblas de San Cayetano, Amorós y del Hondo y colector hasta la laguna del Hondo.
- Analizar el efecto de infraestructuras lineales recientes y la ampliación de sus obras de drenaje transversal, tales como la citada CV-930, CV-91, CV-900, CV-911, CV-855, CV-860, CV-861, A-7, AP-7, N-332 o la línea del AVE, entre otras.
  En este marco, se ha actualizado la Instrucción 5.2-IC por Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, que permitiría ajustarse a caudales mayores para futuras infraestructuras lineales, al tiempo que serviría como referencia para aumentar la capacidad de las existentes, mitigando el efecto barrera que podrían generar.
- Recopilar los datos de las estaciones de aforo existentes desde Murcia hasta Guardamar del Segura con el fin de analizar los caudales registrados y llevar a cabo análisis estadístico para

determinar los caudales asociados a cada periodo de retorno. Si bien este trabajo ya se acometió en 1987 para el Plan de Defensa contra Avenidas, se propone llevarlo a cabo con los datos posteriores a la ejecución de las obras de laminación de avenidas contempladas en el citado Plan de Defensa con el fin de volver a evaluar los caudales asociados a cada periodo de retorno.

- Examinar el estado de las obras de protección del cauce. Estudiar su vulnerabilidad frente a avenidas superiores a las de diseño. Se ha comprobado que, en caso de que se desborden, los muros y motas pueden dar lugar a una inundación cuyo flujo no retorna al cauce debido a que éste no se encuentra en el punto más bajo del valle. Esto lo evidencian los modelos digitales del terreno existentes y el comportamiento que han presentado las aguas en el episodio de septiembre de 2019.
- Establecer un programa de limpieza de cauces, al menos, en las épocas en las que se producen las crecidas, evitando obstrucciones que den lugar a desbordamientos.
  La vegetación y los residuos existentes en el cauce pueden reducir la capacidad de evacuación en los estrechamientos, como ocurre cuando el agua alcanza la cota del tablero de algún puente sobre el cauce.
- Ejecución de las presas de:
  - Tabala y Arroyo Grande
  - Torregorda
  - Secasalada (entre Albatera y Orihuela)
- Evaluar la capacidad de desagüe de las zonas de la Vega Baja que se encuentran por debajo del río Segura.
  Como se ha señalado, algunas zonas se encuentran por debajo del río, por lo que reciben las escorrentías de las ramblas que llegan a ellas, además de la lluvia que reciban y, en caso extremo, las aguas que procedan de un desbordamiento. Por tanto, su drenaje debe hacerse de forma independiente al río, lo que podría requerir la ampliación de la sección transversal de las azarbes o nuevos encauzamientos que pudieran discurrir por el fondo del valle.
  En todo caso, los azarbes deben mantener su funcionamiento a cielo abierto, por lo que no pueden ser cubiertos bajo ningún concepto.
- Establecer zonas de sacrificio: consiste en reservar amplias zonas para el almacenamiento del agua en caso de avenidas, laminando la avenida y resguardando al resto del territorio de los efectos de las inundaciones. Como ejemplo, los antiguos meandros del río Segura, eliminados con el encauzamiento que se ha realizado del río desde Contraparada (Murcia) hasta Guardamar del Segura (Alicante), podrían emplearse para estos usos, ya que son zonas donde las afecciones serían reducidas. Con un diseño adecuado, estas aguas podrían aprovecharse posteriormente para el regadío.
- En este sentido, y fundamentalmente en la zona costera de la comarca, se podrían plantear diferentes parques inundables con un carácter similar al ejecutado en el Parque de “La Marjal” en Alicante.
- Así mismo, en las zonas urbanas más bajas, se deberían implementar los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), capaces de reducir los volúmenes de escorrentía y de aprovechar el volumen de agua captado para riego posterior.
- Vincular la normativa urbanística a los riesgos asociados a la inundación:
  - Debe hacerse una aplicación efectiva de las directrices del PATRICOVA en materia de gestión del territorio, así como en la materialización de las medidas correctoras que contempla.
  - Estos riesgos asociados a la inundación, así como las restricciones urbanísticas asociadas al PATRICOVA, afectarán negativamente a la capacidad de desarrollo urbanístico de las zonas inundables, por lo que, en aquellos municipios en que resultara

factible, se podrían establecer mecanismos de compensación para los propietarios con derechos urbanísticos consolidados en zonas de alto riesgo de inundación.
    - En cualquier caso, los municipios deberán llevar a cabo planes de inundabilidad a escala local que precisen esas zonas de alto riesgo ya que el PATRICOVA ofrece resultados a escala regional, insuficientes para el detalle requerido por el planeamiento urbanístico, de manera que ese planeamiento pueda adaptarse a los resultados de esos planes locales de inundabilidad.
- En el marco de la alternativa anterior, se podría analizar la eliminación de determinadas edificaciones públicas o privadas por una localización que les suponga daños muy graves, dificulte la evacuación de flujos o afecte al buen funcionamiento de servicios de emergencias, debiendo contar preceptivamente con el consenso de los afectados.
- En aras a proteger de las inundaciones a las capas más vulnerables de la población, se propone que, a la luz de los planes de inundaciones a escala local que deberán elaborar los Ayuntamientos y para las zonas de mayor peligrosidad, se determinen cuáles son los barrios de menor renta disponible por unidad de consumo (hogares), de modo que las administraciones públicas, en especial los Ayuntamientos, puedan otorgar subvenciones a esas familias para facilitarles el acceso a un seguro de sus viviendas para que queden cubiertas por el Consorcio de Seguros en caso de una nueva catástrofe. Este mismo concepto es aplicable al sector agrícola, al industrial y al comercial. En la figura siguiente se muestra el comunicado que el Consorcio de Compensación de Seguros ha realizado en relación con este episodio de inundaciones, donde se puede apreciar claramente que, para ser cubierto, se requiere que se esté previamente asegurado:



CONSORCIO DE COMPENSACION DE SEGUROS

EL CONSORCIO DE COMPENSACIÓN DE SEGUROS
INFORMA A LOS **ASEGURADOS** PERJUDICADOS
POR LAS INUNDACIONES OCURRIDAS EN **LA COMUNIDAD VALENCIANA**

1º. El CONSORCIO DE COMPENSACIÓN DE SEGUROS, Entidad Pública del MINISTERIO DE ECONOMÍA Y EMPRESA, indemnizará los daños producidos a las PERSONAS o en los BIENES sobre la base de los siguientes REQUISITOS:

a) Con carácter general, ESTAR PREVIAMENTE ASEGURADO. Por tanto, las personas o los bienes dañados deberán estar amparados por una póliza de seguro que esté vigente en el momento de producirse los daños.

b) En el supuesto de DAÑOS A PERSONAS, antes deberán tener concertada una póliza de seguro que cubra el riesgo de ACCIDENTES, incluso de forma combinada con otras coberturas o como complemento de las mismas (por ejemplo, en una póliza de seguro de vida), o una póliza del ramo de VIDA que garantice EXCLUSIVA O PRINCIPALMENTE el riesgo de FALLECIMIENTO.

c) En el caso de VEHÍCULOS AUTOMÓVILES (turismos, camiones, autobuses, vehículos comerciales, motocicletas, ciclomotores...), se indemnizarán los daños, tanto en el caso de que el vehículo estuviera asegurado con alguna cobertura de daños al propio vehículo (por ejemplo, rotura de lunas, robo o los conocidos como seguros a todo riesgo con o sin franquicia), como en el supuesto de que solamente lo estuviera por una póliza de responsabilidad civil (pólizas conocidas habitualmente como de "seguro obligatorio" o de "daños a terceros").

d) En los OTROS TIPOS DE BIENES, la póliza de seguro deberá incluir la cobertura de alguno de los siguientes riesgos: incendio, robo, rotura de cristales, daños a maquinaria, equipos electrónicos, ordenadores, o modalidades combinadas de los mismos como, por ejemplo, las pólizas conocidas como multirriesgo del hogar, de comunidades, de oficinas, de comercio, de talleres, de industria, pólizas pyme, etc.

e) Además de los daños directos en los bienes, el Consorcio de Compensación de Seguros indemniza los daños por PÉRDIDA DE HABITABILIDAD y DESALOJO FORZOSO de una vivienda o inmueble, así como la PÉRDIDA DE BENEFICIOS del negocio o actividad afectados, siempre que estos conceptos se encuentren asegurados en la póliza de seguro contratada, sean consecuencia de un daño directo en los bienes asegurados, y los bienes sean propiedad o estén a disposición del propio asegurado.

Figura 14. Apartado 1 del comunicado emitido por el Consorcio de Compensación de Seguros en relación con las inundaciones. Fuente: Consorcio de Compensación de Seguros.

- Elaboración de un plan de Emergencias comarcal que mejore la coordinación entre el SAIH de la CHS, Protección Civil y las concejalías competentes de los Ayuntamientos, facilitando la toma de decisiones y transmitiendo la información a la ciudadanía en tiempo real mediante una APP.
- En este sentido, se deberían realizar talleres formativos y de concienciación social, lo cual se puede articular gracias a un proyecto LIFE aprovechando la nueva convocatoria 2021-2027.
- Creación de un Centro de Investigación, de rango europeo, en Extremos, Emergencias y Tecnologías del Agua.

- Otras medidas relacionadas con el impulso socioeconómico que precisa la comarca harían referencia a:
    - Aprovechando el acuerdo para que se ubique una sede del Distrito Digital de la Comunidad Valenciana en Orihuela, se debería apostar por la generación de un centro de economía creativa y digital con énfasis en los sectores agrícola y turístico, tanto patrimonial como residencial de "sol y playa".
    - Promoción de marca territorio para la Vega Baja.
    - Refuerzo del clúster agroalimentario de la Vega Baja.
    - Impulso al nodo logístico de San Isidro.
    - Parada del AVE en Orihuela y mejora de los servicios de Cercanías Alicante-Murcia.
    - Desarrollo de otras infraestructuras como la Autovía CV-95, duplicación de la N-332 a la altura de Torrevieja, conexión ferroviaria del litoral de la Vega Baja o la conexión de ambas márgenes del río Segura a la altura del Hospital de San Bartolomé.

Se ha de poner el énfasis en que las medidas de carácter hidráulico e hidrológico deberán ser sustentadas por los correspondientes estudios en profundidad y que, en todo caso, todas estas propuestas deberán ser participadas y consensuadas por el tejido socioeconómico de la Vega Baja y las administraciones competentes para garantizar la corresponsabilización de las actuaciones y sus resultados.

5. ALTERNATIVAS DE FINANCIACIÓN DE LAS ACTUACIONES NECESARIAS

Resulta evidente que el presupuesto para acometer estas acciones se elevará a algún centenar de millones de euros, lo que requerirá de fórmulas de financiación que permitan su ejecución en el corto-medio plazo. En este epígrafe se recoge la posibilidad de acudir a fondos europeos, así como de movilizar recursos mediante la Participación-Público-Privada y, específicamente, el modelo concesional basado en el Pago Por Disponibilidad.

5.1. Fondos Europeos

Actualmente, se está negociando en el seno de Unión Europea la distribución de Fondos FEDER para el próximo periodo 2021-2027 (Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional y al Fondo de Cohesión, del 2 de mayo de 2018). En este marco, los Estados miembros deben remitir lo antes posible a la Comisión Europea sus propuestas de líneas de actuación para que sean finalmente financiadas por los fondos FEDER.

En los Anexos 1 y 2 de la Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional y al Fondo de Cohesión se recogen los cinco grandes objetivos políticos perseguidos por estos fondos. Concretamente, el segundo de ellos agrupa diferentes objetivos específicos, entre los que se encuentra: "Promover la adaptación al cambio climático, la prevención de riesgos y la resiliencia ante las catástrofes".

Así, para este objetivo político y objetivo específico, se establecen una serie de indicadores de rendimiento, de realización y de resultados, de los cuales se han extraído aquellos que tienen relación con la protección frente a las inundaciones tal cual recoge la siguiente tabla:

OBJETIVO POLÍTICO	OBJETIVO ESPECÍFICO	INDICADORES DE RENDIMIENTO		INDICADORES COMUNES DE REALIZACIÓN Y DE RESULTADOS	
		REALIZACIÓN	RESULTADOS	REALIZACIÓN	RESULTADOS
2. Una Europa más verde y baja en carbono, promoviendo una transición energética limpia y equitativa, la inversión verde y azul, la economía circular, la adaptación al cambio climático y la prevención y gestión de riesgos	(iv) Promover la adaptación al cambio climático, la prevención de riesgos y la resiliencia ante las catástrofes	CCO 09: Seguimiento, alerta y sistemas de respuesta ante catástrofes nuevos o mejorados	CCR 08: Población adicional que se beneficia de medidas de protección contra las inundaciones, los incendios forestales y otras catástrofes naturales relacionadas con el clima	RCO 24: Sistemas nuevos o mejorados de seguimiento, preparación, alerta y respuesta ante catástrofes	RCR 35: Población que se beneficia de las medidas de protección contra las inundaciones
				RCO 26: Infraestructuras verdes para la adaptación al cambio climático	RCR 37: Población que se beneficia de medidas de protección contra catástrofes naturales relacionadas con el clima (distintas de las inundaciones y los incendios forestales)
				RCO 27: Estrategias nacionales/regionales/locales que abordan la adaptación al cambio climático	RCR 38: Tiempo medio estimado de respuesta ante situaciones de catástrofe

Tabla 1. indicadores de rendimiento para promover la adaptación al cambio climático, la prevención de riesgos y la resiliencia ante las catástrofes.

Por tanto, en las negociaciones para el reparto de fondos europeos, la Dirección General del Agua del Ministerio de Transición Ecológica podrían incluir estas actuaciones y un avance presupuestario a fin de que puedan contar con esa financiación europea, sin olvidar la necesaria cofinanciación de las actuaciones por parte de las administraciones públicas españolas.

5.2. La Participación-Público-Privada y el Pago Por Disponibilidad

Además de acudir a la financiación a través de fondos europeos, la insuficiencia presupuestaria de las administraciones públicas españolas para acometer durante los próximos años las infraestructuras necesarias, nos lleva a plantea un modelo de financiación de "Participación Público Privada" (PPP) basado en el "Pago por Disponibilidad" (PPD) que consistiría en lo siguiente:

- La empresa concesionaria se encarga de sufragar íntegramente la nueva infraestructura hidráulica y los costes de mantenimiento durante el periodo concesional.
- La Administración abonaría un canon anual a la concesionaria en concepto de Pago por Disponibilidad que le permita amortizar durante el periodo concesional los costes construcción, mantenimiento y de remuneración del capital.
- Estos pagos se regulan por contrato de acuerdo a diferentes indicadores de calidad de servicio de la infraestructura (mantenimiento de la capacidad hidráulica, calidad del agua, vigilancia, etc.) que, en caso de incumplimiento por parte de la Concesionaria, incurrirían en descuentos de pago.
- Este sistema es acorde con lo estipulado con en la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos de Sector Público, y supondría una innovación en materia de obras hidráulicas puesto que ya se está ensayando en infraestructuras de otro tipo.

Las principales ventajas del modelo son las siguientes:

- Permitiría movilizar los recursos económicos necesarios porque se evita cargar el gasto al presupuesto general de la administración pública contratante -no consolidaría en el presupuesto- dado que cumple con los criterios y normas del Sistema Europeo de Cuentas (SEC2010) y de Eurostat.
- Garantizaría un adecuado mantenimiento de la obra ejecutada pues, como se ha dicho, es condición que así sea para que el concesionario no vea disminuido sus ingresos vía canon. De esta forma, podrían resolverse los persistentes problemas de mantenimiento debido precisamente a la carencia presupuestaria y que tanto han agravado el impacto de la última DANA en la Vega Baja.

REFERENCIAS

- Agencia Espacial Europea. *Proyecto Copernicus*, Satélites Sentinel 2.
- CHS. (1987). *Plan de defensa contra avenidas de 1987, Confederación Hidrográfica del Segura*. Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura.
- CHS (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015-2021*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- Ezcurra, J. (1995). Encauzamiento del río Segura desde Contraparada (Murcia) hasta Guardamar del Segura (Alicante) y recuperación de los sotos del río. *Revista de Obras Públicas*, 3.341.
- Ezcurra, J. (2002). La creación, desarrollo y futuro de las infraestructuras. Confederación Hidrográfica del Segura. En: J. Cánovas Cuenca y J. Melgarejo Moreno (Coords.), *La Confederación Hidrográfica del Segura, 1926-2001 75º Aniversario*. Ministerio de Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- Ezcurra, J. (2007). Las lluvias torrenciales de septiembre de 1997 y el Plan de Defensas de contra Avenidas de 1987. En: *Confederación Hidrográfica del Segura (2007): Plan de Defensa de 1987 frente a Avenidas en la Cuenca del Segura. XX Aniversario*. Murcia.
- Gómez, J. L. y Grindlay, A. L. (2008). *Agua, ingeniería y territorio: la transformación de la cuenca del río Segura por la Ingeniería Hidráulica*. Ministerio de Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- López, F. y Sarriá, F. (2001). Aridez y sequías en la cuenca del Segura. En: A. Gil Olcina y A. Morales Gil (Eds.), *Causas y consecuencias de la sequía en España*, 187-205. Fundación Caja del Mediterráneo.
- *Memorándum de actuaciones estratégicas para el desarrollo económico de la Vega Baja*, Orihuela, 1 de octubre de 2019.
- Morales, A. (2001). *Agua y territorio en la Región de Murcia*. Fundación Centro de Estudios Históricos e Investigaciones Locales Región de Murcia.
- Ortuño, A. & Arvum Consultoría & Proyectos, S.L. (2019). *Las inundaciones en el río Segura de septiembre de 2019 y avance de alternativas de actuaciones*. Cátedra del Agua, Universidad de Alicante-Diputación de Alicante.
- Ortuño, A. & Arvum Consultoría & Proyectos, S.L. (2019). *Las inundaciones de septiembre de 2019 en la Vega Baja y avance de líneas de actuación ligadas a la confederación hidrográfica del Segura para la solicitud de Fondos Feder 2021-2027*. Foro Fuerza Vega Baja.
- Comisión Europea. (2018). *Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional y al Fondo de Cohesión*, del 2 de mayo de 2018.
- SAIH-Segura.
- Sentinel Hub. https://www.sentinel-hub.com/

METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE LOS DAÑOS CAUSADOS POR AVENIDAS E INUNDACIONES

Alberto del Villar García
Universidad de Alcalá. España
alberto.delvillar@uah.es

RESUMEN

Las inundaciones han sido un fenómeno muy estudiado por numerosas disciplinas científicas. El objetivo de estos estudios contribuir a la reducción de los riesgos o en mitigar los efectos que pueden producirse. La Economía puede aportar una valoración de los riesgos a los que se ve sometida una zona o un determinado activo que nos aporta información al proceso de toma de decisiones. Nuestra contribución es la integración en un modelo de valoración de los riesgos asociados al suceso de fenómenos extremos de precipitación con los daños que pudieran producirse en un conjunto de activos. Para ello, realizamos una aportación en forma de modelo de valoración de activos y determinación del riesgo de inundaciones integrado. Este modelo tiene, entre otros objetivos, el cometido de proporcionar un valor para ser utilizado como referencia en el estudio de medidas a implementar o como indicador de valor del riesgo que pudieran asegurar las compañías de seguros.

1. INTRODUCCIÓN

No existe ningún territorio, área o superficie de la tierra que esté exenta del riesgo de sufrir una inundación. Existen zonas dónde la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos climáticos es mayor que otras, pero no hay excepciones. Tarde o temprano, una fuerte precipitación supera la capacidad de filtración y drenaje produciendo un episodio de inundación.

Las inundaciones son los fenómenos naturales catastróficos más habituales en el mundo. Frente a otras catástrofes naturales (terremotos, erupciones volcánicas, etc.) son los que producen mayores daños y muertes al año.

La materia es de tal importancia que ha dado lugar a la promulgación de una Directiva Europea específica (*Directiva 2007/60 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación*), transpuesta al ordenamiento jurídico español a través del *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*.

No es posible escapar de estos fenómenos recurrentes de inundaciones, pero si es posible establecer una corrección de sus daños en base al conocimiento y la información sobre sus efectos.

A partir de este conocimiento es posible adoptar una serie de medidas encaminadas a prevenir, mitigar y compensar los daños posibles de los fenómenos de inundaciones. Para ello se establecen dos tipos de medidas que presentan incidencia en cada una de las formas descritas. Las medidas no estructurales desempeñan un papel fundamental y son sencillas de aplicar. Son medidas de gobernanza que no requieren construcción o instalación de infraestructuras y, por tanto, tienen una menor incidencia en los presupuestos públicos. Con carácter preventivo, este tipo de medidas puede ser de planes de alerta temprana, medidas de evacuación, medidas de planeamiento urbanístico, etc. Con carácter compensatorio se pueden establecer seguros de inundaciones y sistemas de compensación público basado en servicios ecosistémicos entre usuarios (por ejemplo, compensando a determinadas actividades económicas -

agricultura- por la pérdida de producción/renta por emplear técnicas menos productivas o reducir la superficie de cultivo para establecer barreras naturales de protección). El bajo coste inicial y el potencial de "visibilidad política" para la Administración que implementa estas medidas hace muy factible y atractivo la generalización de este tipo de medidas.

Frente a las medidas no estructurales, las medidas estructurales consisten en la creación de estructuras para reducir o evitar los posibles efectos de las inundaciones. Son medidas sólo de carácter preventivo y presentan el problema del coste. El coste de estas medidas no sólo recae durante su fase de construcción, también requiere de un mantenimiento y conservación para que sea perfectamente operativa durante los episodios de inundaciones que trata de evitar. Este coste es el que frena de alguna manera la adopción generalizada de estas medidas, ya que implica el compromiso de reserva presupuestaria para los años siguientes sobre los presupuestos del agente o de la administración pública encargada de la conservación de la infraestructura.

En el presente trabajo vamos a presentar una metodología para valorar los daños que se producen durante estos episodios en las infraestructuras y otras estructuras sobre el terreno. Esto nos permitirá realizar una aproximación a la valoración cuantitativa del riesgo. Esta metodología combinará dos sistemas. De una parte, un sistema de probabilidad de ocurrencia de fenómenos de inundación. De otro lado un sistema de valoración de activos que permita conocer el capital en riesgo. En combinación ambos sistemas nos proporcionarán una información acerca de los valores económicos que están sometidos al riesgo de inundaciones.

2. DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES

Son muchos los trabajos que han aparecido en los últimos años relativos a la evaluación de riesgos y probabilidad de inundaciones. Todos ellos tienen en común la utilización de una función de distribución de probabilidad para modelizar el riesgo y así determinar un valor medio anual durante un período de tiempo.

2.1. Tipos de modelos para valorar el riesgo de inundaciones

La variedad de modelos y herramientas para la determinación del riesgo de inundaciones presentan unas características comunes fácilmente identificables. Siguiendo a Escuder *et al.* (2010), estas herramientas para la determinación del riesgo de inundaciones pueden clasificarse en dos categorías dicotómicas. Por una parte, atendiendo a la evaluación del riesgo de ocurrencia y de los efectos, podemos identificar herramientas de riesgo parcial o completo. Además, en función del output producido, podemos clasificar estas herramientas en cuantitativas, si arrojan un resultado numérico, o cualitativa, cuando no se produce un resultado numérico.

Tomando en consideración estas dos categorías podemos obtener cuatro tipologías de modelos de evaluación del riesgo de inundaciones, tal y como se refleja en la tabla siguiente.

	Parciales	Completos
Cualitativos	Determinan sólo un componente del riesgo y establecen una valoración cualitativa	Determinan los dos componentes del riesgo y establecen una valoración cualitativa
Cuantitativos	Determinan sólo un componente del riesgo y establecen una valoración cuantitativa	Determinan los dos componentes del riesgo y establecen una valoración cuantitativa

Tabla 1. Tipología de las herramientas para la estimación del riesgo de inundaciones. Fuente: elaboración propia a partir de Escuder *et al.* (2010).

No existe un criterio ni sistema que determine que un tipo u otro de herramientas sea mejor frente al resto. Cada sistema proporciona un tipo de información y análisis que facilita la toma de decisiones. En ocasiones, hay sistemas basados en mapas de riesgos de zonas inundables que identifican elementos clave o concentración de residentes, que pueden cuantificarse. Otros modelos, no basados en mapas, identifican la probabilidad de ocurrencia de los eventos catastróficos y la relacionan con los daños sobre áreas urbanas o rurales.

En cualquier caso, la ventaja de un modelo de análisis del riego de inundaciones viene dada por establecer la relación entre el fenómeno catastrófico y el daño potencial que pudiera causar. La utilización de modelos deterministas de probabilidad de ocurrencia de fenómenos de inundaciones permite pasar de una situación de incertidumbre a un ambiente de riesgo, donde es factible la medida de los efectos probables de este tipo de fenómenos extremos climáticos.

2.2. Evaluación del riesgo

Todos estos modelos deben tener en cuenta la relación entre el riesgo y los efectos de una forma actualizada y adaptada a la vulnerabilidad de las zonas objeto de análisis. No sólo es la ocurrencia de los fenómenos extremos de precipitaciones e inundaciones, también hay que tener presente (Magaña *et al.*) el nivel de vulnerabilidad del área para hacer frente a los efectos de las precipitaciones.

La vulnerabilidad de un área o zona de estudio depende también en gran medida de las medidas instauradas en su espacio para evitar o mitigar las consecuencias de los fenómenos extremos. Una región o área de estudio que haya acometidos medidas estructurales (regulación de caudales extremos, medidas de drenaje urbano y rural, etc.) junto a otro tipo de medidas de carácter no estructural (planes de inundaciones, sistemas de aviso, seguros, etc.) mitigará los efectos de esos daños. De hecho, esta modelización permitiría identificar aquellos elementos que se han "escapado" a un primer análisis del riesgo y que ha concluido en un primer proceso de toma de decisiones que evitan o mitigan estos efectos. Siempre teniendo en cuenta que el riesgo cero no es un escenario factible.

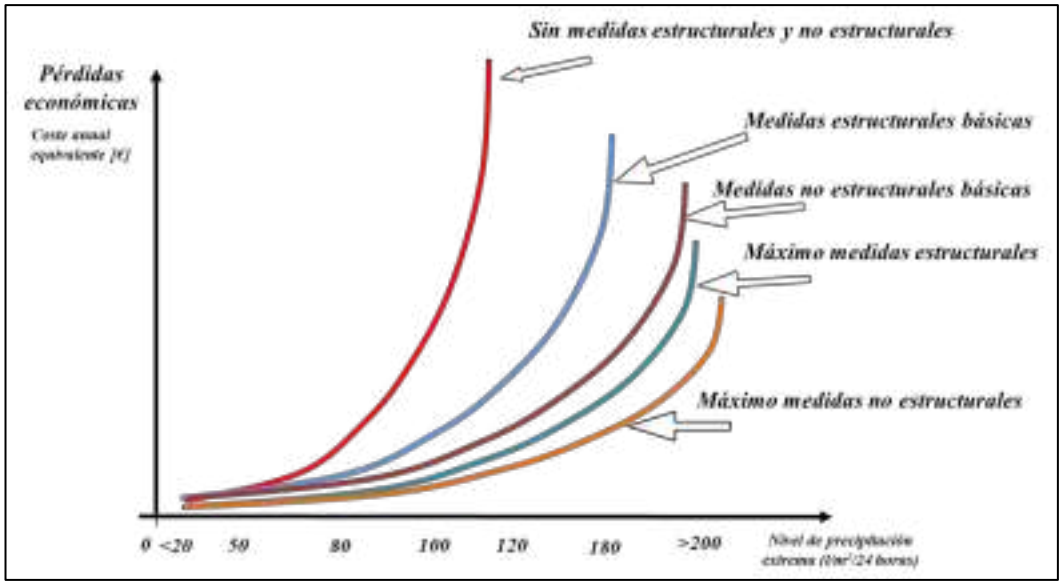


Figura 1. Relación entre el riesgo de precipitación extrema, valor de los daños y medidas adoptadas (estructurales y no estructurales). Fuente: elaboración propia a partir de datos e informaciones de prensa y otras fuentes.

Como podemos apreciar en la Figura 1, los distintos escenarios de medidas adoptadas se traducen en una reducción apreciable de las pérdidas económicas en relación con el nivel de precipitación en un

intervalo de 24 horas. En el escenario sin medidas estructurales o no estructurales, se incrementan de manera considerable las pérdidas económicas esperadas con unos bajos niveles de precipitación. A medida que pasamos a otros escenarios más previsores, el potencial de pérdidas económicas disminuye a pesar del incremento de los niveles de lluvia y de fenómenos de precipitación extrema.

De este modo, llegamos a la conclusión que las pérdidas económicas en zonas con elevada probabilidad de ocurrencia de fenómenos extremos, está fuertemente condicionada por las medidas de carácter preventivo que se han puesto en marcha.

Como hemos adelantado antes, no existe un escenario sin riego, por lo que siempre existirá un potencial de pérdidas económicas que debemos tener en cuenta a la hora de establecer criterios y medidas compensatorias o paliativas de los efectos de estos fenómenos extremos.

2.3. Medida del riesgo

El primer paso para construir un modelo de estimación económica de daños consiste en analizar la frecuencia e intensidad de los fenómenos de precipitación extrema. El debate inicial gira en torno al período de análisis. Podemos recurrir a períodos de retorno cortos de 15 a 25 años, períodos de retorno de plazo medio que abarcan entre 50 y 100 años, o recurrir a períodos de retorno más largos de unos 500 o más años. Es obvio que la selección del período de retorno para el análisis no es neutral y condiciona toda la valoración económica. A mayor número de años, mayores serán los niveles de precipitación máxima registrados. No obstante, también es cierto que la elección de períodos de retorno muy superiores a la vida útil de los activos tampoco tendría sentido económico.

Otra circunstancia que hay que considerar es la duración de los episodios de precipitaciones extremas. Una precipitación de 100 litros por metro cuadrado durante 25 minutos puede tener efectos más devastadores que un evento de 200 litros por metro cuadrado en 24 horas. Esta variación climática dificulta y hace menos predecible nuestra función para analizar la ocurrencia de eventos de precipitaciones extremas. Sin embargo, es cierto que a medida que incrementamos el número de años de nuestra evaluación, van apareciendo mayores episodios de precipitación en menor espacio de tiempo.

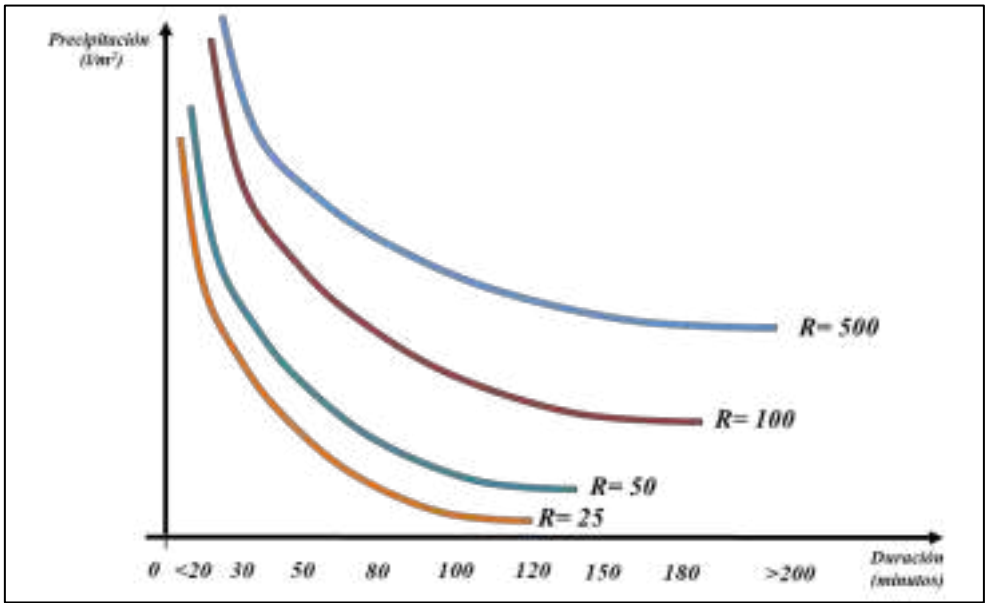


Figura 2. Relación intensidad y duración precipitaciones. Para períodos de retorno R=25, R=50, R=100 y R=500. Fuente: elaboración propia con base en varias fuentes y antecedentes.

Se puede soslayar este problema si, en lugar de tomar la precipitación o los episodios de precipitación extrema, se recurre a la medida del flujo de escorrentía, la altura de inundación o los caudales en determinados puntos de aforo. Esta opción se ha aplicado en varios estudios y trabajos (Ceballos *et al*., 2016) bajo la forma de curvas de daños-altura de las aguas. Estos modelos proporcionan un nivel de daños en una zona en función de la altura alcanzada por la inundación. Sin embargo, pierde algo de precisión cuando se relaciona con la precipitación y un área o región. Salvo en el caso que este sistema de curvas de daños sea un paso intermedio en la precipitación, relacionando el nivel de inundación con el nivel de precipitación. Para simplificar nuestro modelo, no tendremos en cuenta esta circunstancia y analizaremos los fenómenos de las inundaciones con relación a los episodios de precipitaciones durante 24 horas.

En estas circunstancias, para poder obtener una función donde podamos predecir la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de precipitación extremos, calculamos los parámetros y variables correspondientes a una Función de Probabilidad (FP) de concentración de precipitaciones en 24 horas, utilizando datos históricos disponibles.

La Figura 3 señala el riesgo anual de ocurrencia de fuertes precipitaciones (acumulado) en 24 horas, para cada uno de los períodos de retorno contemplados. En un período de retorno de 25 años, la probabilidad de una precipitación acumulada de más de 100 litros por metro cuadrado en 24 horas es del 4%, mientras que si contemplamos un período de retorno mayor (500 años), la probabilidad de ocurrencia de este nivel de precipitaciones es del 10%.

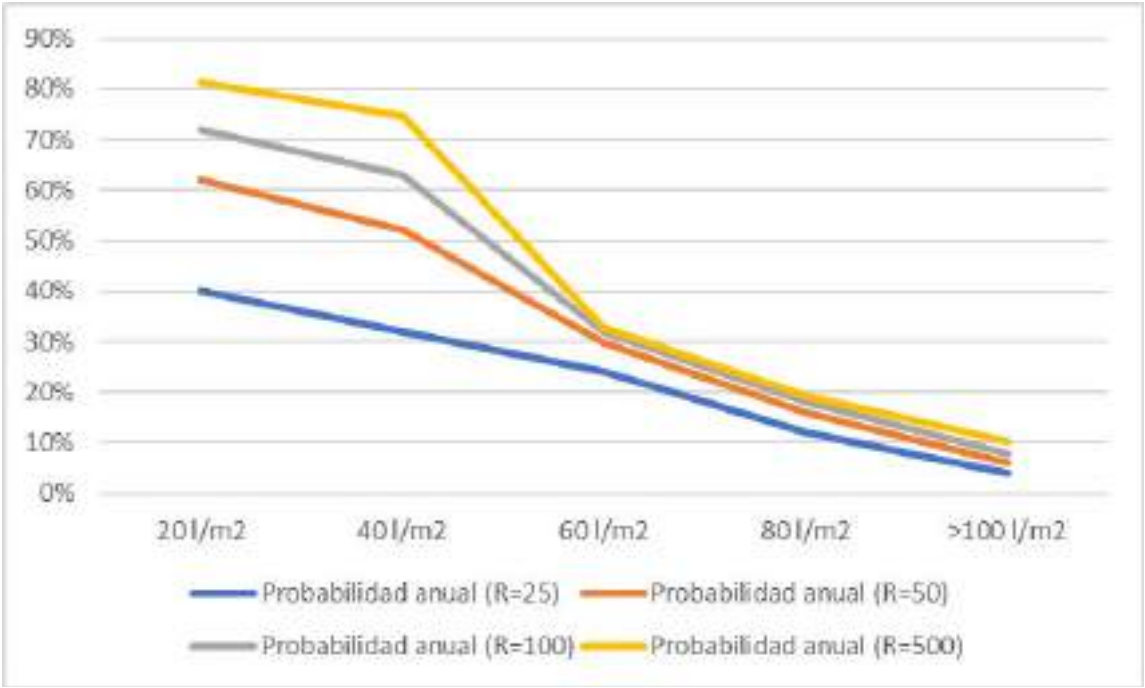


Figura 3. Probabilidad de fenómenos de fuertes precipitaciones en 24 horas. Para períodos de retorno R=25, R=50, R=100 y R=500. Fuente: elaboración propia con base en varias fuentes y antecedentes.

A los efectos de nuestro modelo, nuestra función de probabilidad asociada a los fenómenos extremos sería la que sigue:

$$FP = P(i_t) \qquad [1]$$

Donde $P(i_t)$ es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno extremo i con relación al período de

retorno *t*. El valor de i se obtiene de los niveles de precipitación durante 24 horas considerados a partir de determinado nivel extremos y capaces de producir daños materiales.

No tiene sentido económico establecer cálculos sobre períodos de retorno muy amplios, salvo que el análisis se centre en daños personales, donde la variable económica queda más difuminada. En general, un análisis sobre un ciclo de 50 años sería apropiado para establecer los riesgos sobre activos y patrimonio, dado que la vida útil económica de estos elementos no superará dicho plazo. Establecer un período de evaluación económica sobre períodos de retorno de 100 o 500 años queda fuera de la lógica, ya que no existen activos o elementos productivos que pudieran tener un período de vida útil tan largo.

3. VALORACIÓN ECONÓMICA

Hay modelos que recogen una estimación de daños omnicomprensiva o completa, analizando todas las consecuencias que pueden recogerse en daños tangibles y daños intangibles. Daños que pueden ser directos e indirectos (Nascimento *et al*., 2007) o, en función de la escala espacial, diferenciando entre microescala y macroescala. Todo ello con modelos que establecen valoración de costes con efectos a corto plazo, a medio y largo plazo.

Estos modelos de valoración amplia o completa suelen ser de formulación muy compleja y presentan problemas a la hora de determinar un orden de magnitud de cuantificación económica de los daños. Por ejemplo, cuando se determina el importe de daños indirectos a través de la pérdida de salarios por la interrupción de la actividad económica, hay que determinar las actividades perjudicadas, el tipo de puestos en trabajo afectados, los niveles salariales, el tiempo estimado, etc. Sólo este apartado ya resulta de una complejidad tal, que requiere de una estimación a través de índices de situación económica para aplicar valores estandarizados, perdiendo nivel de información en el proceso.

Los modelos completos más simples, determinan los efectos económicos indirectos a través de un porcentaje de repercusión sobre la producción de la zona (medida a través del Producto Interior Bruto). Este importe se adiciona a las pérdidas económicas en los activos e infraestructuras identificados en el proceso de cuantificación.

Nuestra propuesta se basa precisamente en la utilización de un modelo simple de cuantificación de costes directos, atendiendo a la naturaleza de los activos. No hay valoración de costes indirectos, pero si es posible adicionarlos si existe una cuantificación externa, ya que se trata de un modelo de adición de costes en donde se suman las valoraciones parciales de cada uno de los elementos.

Cada uno de los activos y elementos debe ser valorado dentro de su grupo. Se han determinado las siguientes categorías de bienes y activos a valorar:

a) Bienes inmuebles de carácter residencial. Son aquellas construcciones que tengan la finalidad de uso como vivienda, así como los anejos a los mismos (garajes, trasteros, etc.). Su valoración dependerá de varios factores, entre los que se encuentra el estado de conservación.
b) Bienes inmuebles de carácter comercial e industrial. Se puede añadir los inmuebles de servicios, tanto de naturaleza pública (Locales Administración, colegios públicos, etc.) como de naturaleza privada (oficinas, colegios y clínicas privadas, etc.). En su valoración se atenderá a los diferentes atributos y factores que determinan su precio.
c) Infraestructura pública. Comprendida por viales, redes de comunicación, aeropuertos, instalaciones que prestan servicios de abastecimiento, saneamiento o depuración de aguas residuales, etc. En este punto tenemos que identificar dos situaciones. Por una parte, eventos y catástrofes donde las infraestructuras puedan ser reparadas y volver a recuperar su

funcionalidad previa con un mínimo coste. Por otra parte, la reposición completa de la infraestructura. En el primer caso, adoptaremos un sistema de valoración de daños basado en el coste de reparación y restitución a la operativa anterior al evento. En el segundo caso, se valorará por el coste de reposición a nuevo, pero no en su estado de reposición previo a la inundación. Esta valoración del segundo caso es polémica, pero está fundamentada en la reconstrucción de esta infraestructura. El daño se valora en base al coste de oportunidad de sustitución de las instalaciones de los servicios. No se procede en los otros casos a la aplicación de este criterio, dado que los activos productivos y residenciales presentan procesos de desgaste que van implícitos en las actividades. Una instalación industrial puede sustituirse al mismo estado previo a las inundaciones. Sin embargo, si se produce una renovación de las instalaciones y mejoras, se cambia la productividad y se produce una mejora con relación a la situación previa a las inundaciones. Estos servicios son esenciales para el territorio, y no se reponen las instalaciones al estado previo a la inundación. Se construyen nuevas instalaciones que cumplan con el servicio bajo estándares actuales. Sin embargo, las reparaciones extraordinarias de menor envergadura restituyen las instalaciones al estado anterior, siempre que no incluyan mejoras.

d) Instalaciones agrarias, ganaderas y pesqueras. Los procesos de inundaciones pueden favorecer la productividad de los suelos agrícolas al renovar los sustratos. Pero es un valor muy indeterminado como para poder realizar una cuantificación de ciertas garantías. Sin embargo, las instalaciones agrarias si pueden ser objeto de daños y se puede determinar el alcance de éstos. Los activos de estas explotaciones deben cuantificarse a valor de reposición previo a las inundaciones. Otro apartado es el correspondiente a las cosechas perdidas, que hay que cuantificar a través del método de costes incurridos. Se han de cuantificar todos aquellos costes que se hayan materializado para la producción agraria y que no se haya llevado a término debido a un episodio de inundaciones.
e) Bienes muebles. Aquellos elementos e instalaciones no radicados o incluidos en un bien inmueble. Son de naturaleza tales como elementos de transporte, instalaciones, mobiliario, etc. Se determinará su importe sobre el valor de reposición al estado previo al suceso de inundaciones.

3.1. Bienes inmuebles de carácter residencial

Los bienes inmuebles de carácter residencial presentan una problemática específica para su valoración económica. Habitualmente, se sigue una metodología de valoración basada en costes o precios de mercado, a la que se ajusta un valor en concepto de depreciación por el desgaste y transcurso del tiempo.

Sin embargo, existe otro flujo económico que condiciona la valoración de los inmuebles de carácter residencial como es el componente espacial y temporal. Es por ello por lo que algunos investigadores (Armengot, *et al.*) se posicionan a favor de utilizar un modelo de precios hedónicos que recoja estos componentes de valoración de los inmuebles que no es posible que se determinen mediante un procedimiento de cómputo de costes y detracción de depreciación.

Al margen de los posibles sistemas para valorar los inmuebles de carácter residencial, lo cierto es que el valor de una construcción es una relación entre su valor de reposición a nuevo y su depreciación, ajustada por un coeficiente de amortización. Siguiendo a Núñez Scarpellini (2015) tenemos la siguiente relación:

$$VA_{IResidencialin} = \sum_{i=1}^{z} VR_i - (VR_i - Vr_i) \times K_n \qquad [2]$$

Donde $VA_{IResidencialin}$ es el valor actual del sumatorio de los z inmuebles de carácter residencial en el año n, VR_i es el valor de reposición a nuevo de los inmuebles i, Vr_i es el valor residual de los z inmuebles después de su vida útil (sin incluir el suelo) y k_n es el coeficiente de depreciación

acumulado del año n que relaciona la pérdida de valor de los inmuebles con relación al tiempo, que recoge el sistema de amortización y la valoración del estado de conservación del inmueble i.

La parte fundamental de esta relación es el coeficiente de depreciación *k*. Un coeficiente bajo proporciona una valoración mayor del inmueble en los primeros años. Al contrario, un coeficiente alto nos proporciona una amortización muy acelerada y, por tanto, un menor valor del inmueble en los primeros años. Esta relación se puede apreciar en la Figura 4 siguiente, donde a partir de que dinámica recoja el coeficiente de depreciación la curva acelerará la depreciación del bien o la ralentizará.

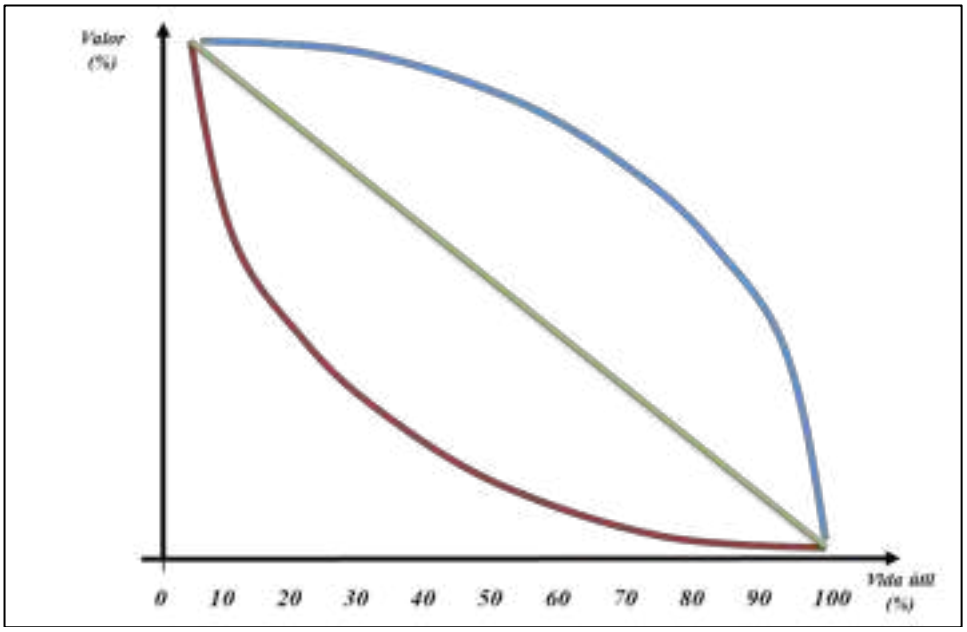


Figura 4. Curva de depreciación de los bienes inmuebles a partir del valor tomado por el coeficiente k. Fuente: elaboración propia a partir de Núñez Scarpellini (2015).

Sin embargo, la obsolescencia y depreciación del bien por el transcurso del tiempo no es el único factor que reduce su valor. Núñez Scarpellini, en su índice JANS, realiza una adaptación del método Ross-Heidecke combinado tres factores para la valoración de un inmueble:

1. La edad del inmueble.
2. La vida útil *probable* del inmueble.
3. El estado de conservación del inmueble.

El método Ross-Heidecke nos proporciona un coeficiente de depreciación que es de aplicación sencilla a nuestra fórmula basado en la edad y conservación del inmueble, proporcionando un valor inmediato en función del tiempo y transcurrido y la vida útil del inmueble.
No obstante, emplear este sistema de valoración en inmuebles con edades superiores a 50-60 años presenta algunos problemas difíciles de soslayar. Este método nos proporciona una valoración muy reducida debido a la penalización del paso del tiempo. Puede llegarse al caso de establecer valoraciones de carácter testimonial en inmuebles históricos con un buen grado de conservación.

Es por ello que la adaptación de Núñez Scarpellini, al incluir un coeficiente de estado de conservación en la formulación de este modelo, soslaye de alguna forma este problema. De esta forma al combinar las hipótesis de antigüedad y estado de conservación, mitiga el defecto de emplear métodos basados únicamente en el paso del tiempo como elemento de valoración.

De tal manera, que el coeficiente k que hemos identificado unas líneas más arriba, en la fórmula [2], debería estar compuesto por tres factores, que relacionaran la edad del inmueble en relación con su vida útil, el estado de conservación y un coeficiente "X" que define el tipo de bien.

$$k_n = f(k_{1)} \times f(k_2) \times f(X) \qquad [3]$$

Donde k_1 es el factor que relaciona la edad del inmueble con relación a los años de su vida útil, k_2 es el estado de conservación del bien inmueble, y X el índice JANS para definir la curva de depreciación del bien.

3.2. Bienes inmuebles de carácter comercial e industrial

En el caso de bienes inmuebles que no sean para uso residencial, cabría la posibilidad de utilizar el método de valoración propuesto para el caso de los inmuebles residenciales. Sin embargo, existe una serie de características que pueden llegar a "matizar" de alguna manera la valoración de este tipo de estructuras.

Por una parte, son bienes de naturaleza inmobiliaria con un coste de producción y un estado de conservación determinado. Pero también son elementos donde se desarrolla una actividad productiva que puede mostrar ciertos signos de obsolescencia para la correcta prestación del servicio para el que fueron diseñados.

Un caso a modo de ejemplo sería un inmueble construido hace unos 25-30 años que albergara un colegio. Las necesidades, prestaciones y servicios para el que fue diseñado en su tiempo, están, sin ninguna duda, fuera de los estándares considerados en la actualidad. Con independencia del estado de conservación de este inmueble, su valor a efectos de producción y prestación de los servicios para los que fue diseñado, están ahora mismo en un rango inferior al calculado sólo teniendo en cuenta el paso tiempo, aun estando en perfecto estado de conservación.

Por ello, la propuesta que incluimos en este apartado es ligeramente diferente de la anterior. No es sólo cuestión del estado de conservación, la vida útil, etc. del bien inmueble. Su valoración también está relacionada con la capacidad de prestar los servicios requeridos en las condiciones actuales de mercado. El criterio de valoración recogerá un factor de idoneidad para su uso actual.

Para nuestros efectos, la fórmula que recogería este criterio de valoración de esta categoría de inmuebles sería la siguiente:

$$VA_{IIndustrialin} = \sum_{i=1}^{z} VR_i \times (1 - k_n)^{(n-1)} \qquad [4]$$

Donde $VA_{IIndustrialin}$ es el valor actual de los z inmuebles de carácter industrial o de servicios en el año n, VR_i es el valor de reposición a nuevo de los z inmuebles y k_n es el coeficiente de depreciación acumulado del año n que relaciona la pérdida de valor de esta categoría de inmuebles con relación al tiempo. Este coeficiente k_n se ve incrementado por el paso del tiempo, acelerando la depreciación y reduciendo su valor con el paso del tiempo de forma acelerada.

3.3. Infraestructura pública

Como se ha detallado más arriba, trataremos dos casos diferentes. En primer lugar, el coste de reparación si la infraestructura puede ser recuperada y volver a prestar servicios en su estado anterior. Y, en segundo lugar, el valor de reposición a nuevo si la reparación no es posible y requiere de una reconstrucción.

El problema para nuestro modelo viene dado por la relación entre el evento extremo de precipitación

y el alcance de los daños. No es sencillo establecer esta relación, ni determinar el nivel a partir del cual los daños producidos impiden una reparación y deber suponer una reposición completa de la infraestructura.

Nuestro modelo de valoración debería recoger la siguiente fórmula:

$$VA_{Infraestructurai} = \sum_{t=1}^{x} CR_{ti} + \sum_{e=1}^{y} VR_{ei} \qquad [5]$$

Donde $VA_{Infraestructurai}$ es el valor actual de las infraestructuras, CR_{ti} es el valor de las reparaciones potenciales esperadas de las *x* infraestructuras en riesgo por el fenómeno extremo de precipitaciones *i*, y VR_{ei} es el valor de reposición a nuevo de las *y* infraestructuras en riesgo por el fenómeno extremo de precipitaciones *i*. Los límites *x* e *y* se han de establecer en función de las infraestructuras catalogadas que potencialmente pueden sufrir daños reparables o es necesaria su total reconstrucción para ser operativas.

3.4. Instalaciones agrarias, ganaderas y pesqueras

Este tipo de activos no estaría tan afectado por la obsolescencia como en el caso de los inmuebles para uso industrial o comercial. Ahora bien, también son elementos donde se desarrolla una actividad productiva que puede mostrar ciertos signos de obsolescencia para la correcta prestación del servicio para el que fueron diseñados, al igual que los inmuebles industriales y comerciales.

Sin embargo, la vida útil de estos elementos es relativamente más reducida que la correspondiente a los inmuebles industriales, con lo que su depreciación por obsolescencia es mucho más reducida.

Por todo, se propone un sistema de valoración convencional, sin más ajuste que el consumo del bien en forma de depreciación por uso y paso del tiempo. La fórmula de valoración propuesta sería la que sigue a continuación:

$$VA_{IAgrariai} = \sum_{i=1}^{z} VR_i - (VR_i - Vr_i) \qquad [6]$$

Donde $VA_{IAgrariai}$ es el valor actual de los z elementos fijos o instalaciones de carácter agrario, ganadero o pesquero i, VR_i es el valor de reposición a nuevo del bien i, y Vr_i es el valor residual del bien i después de su vida útil (sin incluir el suelo).

3.5. Bienes muebles

Aquellos bienes muebles que sean susceptible de valoración, se determinará su importe sobre el valor de reposición al estado previo al suceso de inundaciones. Su fórmula a efectos de nuestro modelo de valoración será:

$$VA_{Bienmueblei} = \sum_{i=1}^{z} VR_i - (VR_i - Vr_i) \qquad [7]$$

Donde $VA_{Bienmueblei}$ es el valor actual de los z elementos o bienes muebles i, VR_i es el valor de reposición a nuevo del bien i, y Vr_i es el valor residual del bien i después de su vida útil.

3.6. Nivel de daños

La valoración de los bienes anteriores no significa que un cómputo total de los daños ante la ocurrencia de episodios de precipitaciones extremos. Lo habitual, en circunstancias normales, los daños inducidos por ciertos episodios de fuertes inundaciones suelen ser de carácter parcial o no completo.

Esta circunstancia nos obliga a plantear un sistema de cuantificación de daños que, en aras de una

simplificación para nuestro modelo, se determina a través de un coeficiente que se obtiene a partir de una función, no lineal, que asocia el nivel de daños sobre los diferentes tipos de activos a partir del nivel de precipitaciones.

Cada tipo de activo debe disponer de su coeficiente de daños independiente del resto. Este proceder se encuentra justificado en el diferente nivel de afección que puede realizar un mismo episodio. Por ejemplo, en el caso de los bienes muebles, su nivel de daños es muy superior que un inmueble de uso residencial frente al mismo episodio.

Para su integración en nuestro modelo, este coeficiente de daños tomará valores entre 0 y 1 dependiendo el tipo de activo el nivel de precipitación. De esta forma, se asocia y valor del daño sobre cada tipo de bien afectado sobre el nivel de precipitaciones.

$$\lambda_i = f(i_t, x_t); \lambda_i \leq 1 \qquad [8]$$

Siendo λ_i el coeficiente de daños que representa el nivel de pérdida de valor del bien tipo i, para un fenómeno de precipitación extremo *i* con relación al período de retorno *t*, en un nivel *x* asociado al periodo de retorno *t*.

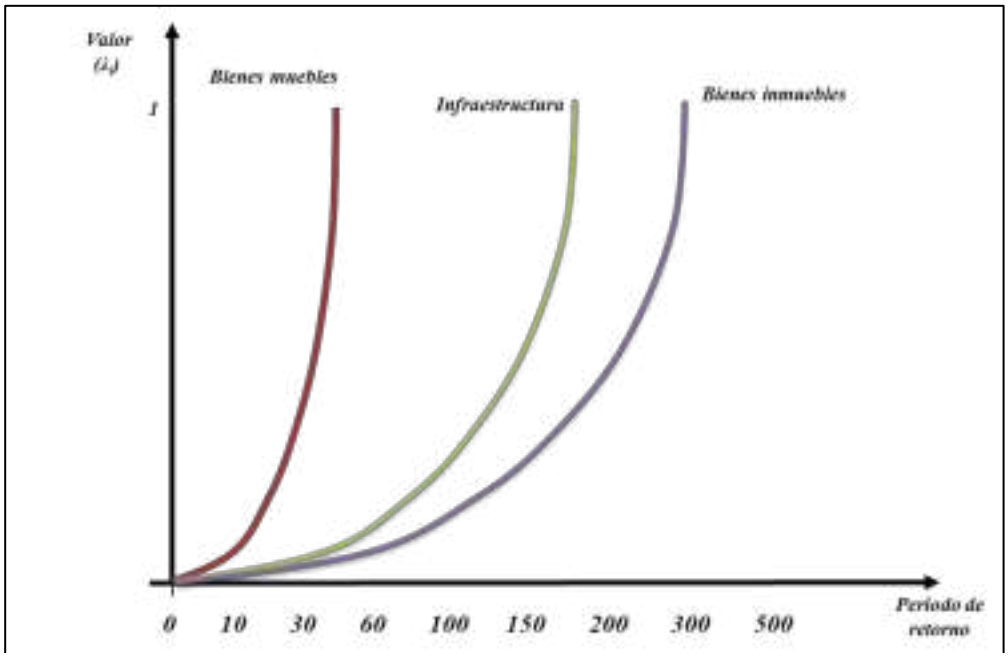


Figura 5. Valores tomados por el coeficiente λ para cada tipo de activo y período de retorno. Fuente: elaboración propia a partir de datos e información. Representación no a escala.

El valor tomado por este coeficiente nos permite ajustar los daños ocasionados por ciertos niveles de precipitación extrema, teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos extremos.

4. INTEGRACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO Y VALORACIÓN ECONÓMICA

Una vez tenemos determinado el riesgo de suceso de episodios de inundaciones y establecido el sistema de valoración económica de los activos en zonas de riesgo, podemos realizar una aproximación para cuantificar económicamente dicho riesgo y la estimación probable de daños.

Para integrar los dos componentes de nuestro modelo determinamos tres escenarios de estragos causados por episodios extraordinarios de precipitaciones y asociamos a cada uno de ellos la probabilidad de ocurrencia conforme a los datos e información sobre precipitaciones existentes, sobre la base de diferentes periodos de retorno para la estimación del riesgo.

Disponiendo de los escenarios de daños y su probabilidad asociada, podremos cuantificar el daño esperado anual y determinar diversos sistemas de estimación económica de ese riego. Para nuestro modelo, partimos de la estimación de probabilidad de ocurrencia de un fenómeno extremo de precipitaciones i_t, que produce un nivel λ_{ix} de daños sobre n bienes afectados por el evento extremo de precipitación i_t.

$$Y_{it} = P(i_t) \times [\sum_{x=1}^{n}(VA_{IResidencialix} \times \lambda_{ir}) + (VA_{IIndustrialix} \times \lambda_{ii}) + (VA_{Infraestructuraix} \times \lambda_{iin}) + (VA_{IAgrariaix} \times \lambda_{ia}) + (VA_{Bienmuebleix} \times \lambda_{im})] \quad [9]$$

Siendo Y_{it} el valor anual del daño esperado por el evento de precipitación extrema i para un período de retorno t. $P(i_t)$ la probabilidad de suceso del episodio de precipitación extrema i para el período de retorno t. λ_{ir}, λ_{ii}, λ_{iin}, λ_{ia} y λ_{im} los coeficientes de daños sobre los inmuebles residenciales, industriales, infraestructuras, instalaciones agrarias y bienes muebles, en caso de ocurrencia del episodio de precipitación extrema i. $VA_{IResidencialix}$, $VA_{Industrialix}$, $VA_{Infraestructuraix}$, $VA_{IAgrariaix}$ y $VA_{Bienmuebleix}$ son los valores actuales de cada grupo de bienes analizados según su estado de conservación, su vida útil y sus valores residuales.

El valor obtenido por Y_{it} es el coste anual equivalente de los daños que provocan los eventos de precipitaciones extremas teniendo en cuenta el período de retorno considerado en el análisis.

5. DISCUSIÓN

Las inundaciones han sido un fenómeno muy estudiado por numerosas disciplinas científicas. Nuestra modestísima aportación a este estudio es una propuesta de valoración económica del riesgo, basada en la pérdida potencial debida a deterioro o daños producidos por fenómenos extremos de precipitación.

Hay varios elementos que podemos introducir para el debate científico y académico de nuestra propuesta. Comenzando por la determinación del riesgo, tenemos una serie de elementos para valorar y debatir su idoneidad.

En este sentido, la asociación del riesgo de inundación y el suceso de fenómenos de precipitación extrema es difícil de determinar. Tenemos variables que afectan al nivel de precipitaciones, la intensidad, la duración, etc. Incluso la selección de la variable temporal en la información es discutible. La elección de períodos de retorno de 500 años no tiene mucho sentido económico, pero si social cuando tratamos de valorar el riesgo en vidas humanas. En términos económicos no se conocen activos, salvo aquellos con un valor artístico, histórico o cultural, que tengan una vida útil económica superior a 50 años. Pero este período de tiempo es tan corto a efectos climáticos que perdemos una parte importante de información al computar los riesgos.

Otro elemento de discusión es la valoración de las medidas instauradas en la determinación del riesgo por los fenómenos extremos. Es cierto que disminuyen los efectos, pero no el riesgo. Su tratamiento puede ser controvertido si se malinterpretan estas medidas en el proceso de toma de decisiones de actividades urbanísticas.

La valoración de daños también presenta unos puntos de interés para el debate. ¿Qué elementos incluimos? ¿Qué efectos valorar? ¿Qué criterios?

Ciertamente un sistema de valoración completo debe incluir no sólo las consecuencias directas del fenómeno que se procede a valorar, también los efectos indirectos de dichos fenómenos. Sin embargo, la determinación de los efectos indirectos suele ser más compleja y nunca exenta de polémica o problemas.

Es cierto que la valoración de los efectos directos es más tangible y fácilmente identificable. Pero esta valoración viene determinada por los atributos intangibles de los activos que se someten a valoración. Un hospital presenta un valor directo por su coste de producción y su capacidad para prestar servicios. Pero también es cierto que esa capacidad (oferta) va relacionada con la población que puede ser atendida (demanda). No tener en cuenta o, al menos, no considerar la existencia de estos efectos indirectos sería cometer un error apreciable.

Ateniéndonos a los sistemas de valoración de activos también tenemos elementos de debate. La ciencia de la tasación presenta numerosas herramientas y criterios que distan de ser homogéneos o aceptados por todos sus miembros. Los mecanismos y tablas de valoración tienen elementos centrales bien diferentes entre modelos que, a primera vista, parecen muy homogéneos y próximos. Las desviaciones en estas valoraciones pueden ir desde unos pocos puntos porcentuales hasta diferencias de más del 40% en valores de tasación sobre el mismo bien. Quizás una solución racional fuera la de proporcionar rangos o intervalos más o menos amplios que incluyeran todas las opciones, pero esta solución traslada incertidumbre en la cuantificación de los riesgos y la determinación de los valores a preservar.

Otro elemento, pero que no finaliza la lista de debate, es la determinación de un valor anual como elemento para la valoración del riesgo. Se ha tomado en consideración este modelo dado que proporciona información inmediata de interés. Primero, nos permite identificar un importe a modo de "prima" que sirve para asegurar estos bienes de los riesgos de precipitaciones extremas. También permite hacer comparaciones con el coste de medidas potenciales que mitiguen este riesgo, a través de un simple análisis coste beneficio (ACB).

6. CONCLUSIONES

Las inundaciones como fenómeno extremo de riesgo han sido analizadas de forma muy intensa desde hace décadas. El análisis del riesgo, la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos y los daños potenciales inducidos no son materia de análisis recientes.

Sin embargo, los avances en casi todas las disciplinas científicas como la cartografía, la hidrología, la geología, etc. Junto con mejoras tecnológicas y mayor capacidad para obtener y procesar información, han conseguido importantes progresos en el campo de pronóstico y prevención de este tipo de desastres naturales.

Es importante establecer una relación entre los riesgos que una sociedad puede soportar y el coste de las medidas que puede permitirse. Es evidente que el *riesgo cero* no existe. También es evidente que siempre es posible implementar medidas que, bien no puedan evitar en su totalidad los daños de los fenómenos extremos de precipitaciones, pero puedan mitigar la mayor parte de sus efectos. El problema es el punto de equilibrio entre estas dos fuerzas contrarias.

A través de una propuesta de modelo de valoración se han realizado una serie de aportaciones para determinar el valor potencial en riesgo de suceso de fenómenos extremos de precipitaciones.

El interés principal es conocer el coste anual equivalente de los daños que pueden producirse debido a fenómenos extremos de precipitaciones. Este valor tiene potencial para poder emplearse en varias aplicaciones. Una de ellas sería en la realización de análisis coste beneficio de implementación de medidas de prevención y mitigación de los efectos. La reducción del valor que proporciona el modelo, derivada de la implementación de la medida, sería el cálculo del beneficio de este análisis en términos de costes evitados para la sociedad.

Otra aplicación sería para las compañías de seguros a modo de cálculo de primas para asegurar estos bienes en zonas inundables. Proporcionaría un valor de referencia para la determinación del riesgo cubierto en los contratos.

REFERENCIAS

- Armengot, J., Ramírez, G. & Bernal, E. (2012). Environment and housing market: incident of the environment in the price of the dwelling. *Proceedings in Advanced Research in Scientific Areas*.
- Armengot, J., Williams, B. & Padial, J. F. (2019). Spatial and temporal impacts on building depreciation. *Journal of Property Research*, 36(2), 206-225, https://doi.org/10.1080/09599916.2019.1602844
- Ceballos Bernal, A. I., Baró Suárez, J. E. y Díaz-Delgado, C. (2016). Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. Aplicación de las curvas inundación-daños en países en Desarrollo. *Investigaciones Geográficas*, 65, 169-180. https://doi.org/10.14198/INGEO2016.65.10
- Escuder, I., Matheu, E. y Castillo, J. (2010, 15 de octubre). Análisis y evaluación de riesgos de inundación: estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales (Presentación). *Análisis y evaluación de riesgos de inundación. Jornada CICCPV*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Gobierno de Chile. División de Evaluación Social de Inversiones (2013). *Metodología general de formulación y evaluación socioeconómica de proyectos de embalses y obras hidráulicas anexas*.
- https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/8/52958/18_2Embalses_Obras_Hidraulicasv2.pdf.
- Nascimento, N., Machado M. L., Baptista, M., De Paula E. y Silva, A. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal*, 4 (3), 195-210. https://doi.org/10.1080/15730620701466591
- Núñez Scarpellini, J. A. (2015, 22-24 octubre). Depreciación de bienes nuevo concepto "Método de JANS" para bienes inmuebles, bienes muebles, maquinarias y equipos (Presentación). *LI Congreso Nacional de Valuación*. Federación de Colegios Valuadores, A.C. Ciudad de Cuernavaca, Morelos (México).

LA FORMACIÓN Y PERCEPCIÓN SOBRE EL RIESGO DE INUNDACIÓN. UNA EXPLORACIÓN A PARTIR DE LAS REPRENSENTACIONES SOCIALES DEL FUTURO PROFESORADO DE EDUCACIÓN PRIMARIA

Álvaro-Francisco Morote
Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad de Valencia, España
alvaro.morote@uv.es
https://orcid.org/0000-0003-2438-4961

María Hernández
Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Alicante, España
maria.hernandez@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-8823-0083

RESUMEN

El riesgo de inundación es el principal peligro natural que afecta a la región mediterránea europea. Este riesgo se ha incrementado en las últimas décadas y se prevee que se intensifique debido a los efectos del cambio climático. Por tanto, conocer las representaciones sociales sobre el riesgo de inudación del futuro profesorado es de vital importancia ya que esta temática debe enseñarse en la etapa escolar. Los objetivos de esta investigación, a modo de estudio de caso (Facultad de Magisterio, Universidad de Valenca) son explorar qué formación recibió el futuro profesorado de Educación Primaria sobre el riesgo de inundación y examinar su percepción sobre los factores que influyen en este riesgo. Metodológicamente, se ha realizado una encuesta a los/as futuros/as docentes de Educación Primaria (80 estudiantes) durante el curso 2019-20. Los resultados muestran que sólo el 17,5% recibió instrucción sobre el riesgo de inundación (Educación Primaria, 24,24%; Educación secundaria, 45,45%; Bachillerato, 15,15%) y, respecto a los factores que influyen en el riesgo de inundación, los participantes piensan que el factor principal es el cambio climático (respuesta principal), y el 55,7% cree que actualmente este fenómeno se ha incrementado durante los últimos años.

1. INTRODUCCIÓN

Los riegos naturales, concretamente los de carácter atmosférico, están generando un volumen creciente de pérdidas económicas y humanas (Pérez et al., 2015). A escala mundial, según el informe publicado por el *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) las inundaciones son el riesgo natural más frecuente (con un porcentaje del 43% sobre el total) y el que a más personas ha afectado (2 billones de habitantes) entre 1998-2017. Respecto a las víctimas por inundaciones, estas han ascendido a 142.088 (el 11% del total generado por desastres naturales). En relación a los daños económicos han supuesto unos 656 billones de dólares americanos (el 23% del total). En Europa, el informe publicado por la *Environmental European Agency* (2017) indica que entre 2000 y 2014 se produjeron unas 2.000 víctimas mortales y cerca de 8,7 millones de afectados. A ello, cabe sumar, los efectos del cambio climático ya que las lluvias torrenciales serán más frecuentes e intensas como

corroboran diferentes informes españoles (Centros de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, 2017) e internacionales (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2018). En España, según Olcina (2018) 2 millones de personas viven en lugares de alto riesgo de inundación y durante el periodo 1995-2015 se registraron 526 fallecimientos por este fenómeno, siendo el área mediterránea la región más afectada por este peligro. En la Comunidad Valenciana (área de estudio), según el Plan de Acción de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación (PATRICOVA, 2015), aproximadamente 600.000 habitantes (el 12% de la población total de esta autonomía) residen en zonas con peligro de inundación.

En cuanto a la enseñanza, en los países desarrollados se considera esencial formar a los futuros ciudadanos en aspectos relacionados con la ciencia. Para ello, la labor docente es probablemente la herramienta más efectiva para mejorar su conocimiento, no sólo en el ámbito científico, sino también en la vida cotidiana (Souto, 2018). Además, y respecto al cambio climático, la educación es un factor no structural que se debe considerar para hacer frente a este fenómeno y lograr una sociedad más resiente, pero, sin embargo, tradicionalmente esta variable no se suele tener en cuenta (Morote, 2019a). Desde las Ciencias Sociales, y más concretamente desde la Geografía, se puede contribuir a aumentar el conocimiento sobre el riesgo de inundación (Morote, 2019b). La Geografía aporta en la educación la dimensión espacial del conocimiento, facilitando la comprensión de la información, de conceptos, procedimientos y actitudes referentes a la localización y distribución de diferentes hechos sobre el espacio (Souto, 2018). Para el caso de la Educación Primaria (cursos de 1º a 6º; de 6 a 12 años), cabe indicar que los contenidos geográficos se tratan en el área de Ciencias Sociales que, permiten la adquisición de destrezas para analizar la ocupación del espacio por la sociedad y valorar críticamente el territorio resultante de esa transformación (Morote, 2019b).

En el ámbito internacional, diferentes investigaciones en la última década han puesto de manifiesto la importancia del estudio de las inundaciones en todos los niveles educativos (Ahmad y Numan, 2015; Lechowicz y Nowacki, 2014; McWhirter y Shealy, 2018). En España, la mayoría de la producción científica sobre el riesgo de inundación se ha llevado a cabo desde las Ciencias Experimentales y Naturales (Díez, 2015). En cuanto a la Didáctica de la Geografía y/o Ciencias Sociales, no es habitual encontrar este tipo de trabajos, salvo algunas investigaciones recientes realizadas en la región valenciana (Morote, 2017; Morote y Pérez, 2019; Morote, 2019b).

El problema de investigación que se plantea en este trabajo es que, en España, el riesgo de inundación es un tema de relevancia social, económica y territorial. Por tanto, debe ser objeto de estudio por el alumnado de Educación Primaria para contribuir a la comprensión de este fenómeno. La inclusión de los problemas que se pueden denominar como "socio-ambientales" son relevantes en las aulas de Ciencias Sociales (Morote, 2019b). Pero debido, probablemente, a la escasa formación y desconocimiento que tiene el profesorado (actual y futuro) sobre esta materia, su trasmisión a las cohortes más jóvenes puede resultar algo confuso (Morote, 2019b). Por lo tanto, esta temática requiere un tratamiento necesario en la formación del profesorado.

El interés de esta investigación se apoya en las siguientes cuestiones: 1) en España, el riesgo de inundación constituye el peligro natural más importante que afecta a este país, especialmente, en el área mediterránea; 2) la región valenciana se ha convertido en una "región-riesgo" (Calvo, 2001) tanto por sus características climáticas como por la ocupación urbana (ocupación y urbanización de zonas inundables); 3) según los escenarios futuros de cambio climático, los riesgos de inundación serán cada vez más frecuentes e intensos (IPCC, 2018); 4) el escaso número de investigaciones sobre Didáctica de la Geografía que tratan el riesgo de inundación, tanto en el área de estudio (región mediterránea) como a nivel nacional; 5) La relevancia del factor "educación" ya que se trata de una medida no estructural tradicionalmente desestimada para reducir el riesgo; y 6) este temática debe tratarse en la Educación Primaria (Bloque 2 del área de Ciencias Sociales) tal y como establece el

actual currículo educativo recogido en la Comunidad Valenciana por el Decreto 108/2014 de 4 de julio y a nivel nacional por el Real Decreto 126/2014 de 28 de febrero.

Los objetivos de esta investigación, a modo de estudio de caso (Facultad de Magisterio, Universidad de Valencia) son explorar explorar qué formación recibió el futuro profesorado de Educación Primaria sobre el riesgo de inundación y examinar su percepción sobre los factores que influyen en este riesgo. La hipótesis de partida de este trabajo es que la mayoría del futuro profesorado de Educación Primaria que ha intervenido en esta investigación no recibió formación previa sobre esta temática durante su etapa escolar. Y, en segundo lugar, este profesorado en formación tiene la percepción de que el riesgo de inundación se ha agravado en los últimos años debido al cambio climático (incremento de la peligrosidad) y no tanto por factores humanos (por ejemplo, por ocupación de zonas inundables).

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño de la investigación

Esta investigación se basa en un estudio descriptivo y exploratorio de tipo mixto (no experimental). Adopta un diseño transversal ya que la información analizada se ha recogido en un momento puntual (curso 2019-20) y a modo de estudio de caso (alumnos/as de la Facultad de Magisterio de la Universidad de Valencia, España).

2.2. Contexto y participantes

En relación con el contexto y los participantes, el procedimiento de selección ha sido un muestreo no probabilístico (muestreo disponible o de conveniencia). Se han seleccionado dos grupos del 4º curso del Grado en Maestro/a en Educación Primaria de la Facultad de Magisterio (Universidad de Valencia) que cursan la asignatura de Didáctica de las Ciencias Sociales. Aspectos Aplicados (código 33651; curso 2019-20). Respecto a la representatividad de la muestra, teniendo en cuenta el total de alumnos/as matriculados/as (un total de 96 estudiantes), un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, para obtener una muestra representativa deberían participar como mínimo 77 alumnos/as. Finalmente, la cifra total de participantes ascendió a 80, logrando, por tanto, un número representativo.

En relación con las características socio-culturales, cabe destacar que la mayoría de los/as participantes fueron mujeres (el 67,05%). Estos datos se encuentran en los rangos normales del tipo de alumnado de la Facultad de Magisterio, ya que la cifra de estas para el último curso asciende al 70,26% (Universidad de Valencia, 2020). Respecto a la edad, la muestra se sitúa mayoritariamente en el rango entre los 21-25 años (97,5%).

2.3. Instrumento de análisis y procedimiento

El instrumento diseñado para llevar a cabo esta investigación ha consistido en la realización de un cuestionario que ha permitido obtener la información necesaria para responder a los objetivos propuestos. El cuestionario se dividía en 6 apartados con un total de 19 ítems: 1) Características sociales; 2) El riesgo de inundación en tu municipio; 3) Episodios de inundación en el centro escolar (Educación Primaria). El camino de casa al colegio; 4) Formación sobre los riesgos de inundación durante la etapa escolar; 5) La percepción sobre la aseveración del riesgo de inundación; y 6) La formación docente sobre los riesgos de inundación en Educación Primaria. Para esta investigación (según los objetivos propuestos) se han utilizado los resultados obtenidos de las partes 4ª y 5ª (ver Tabla 1).

Parte 4. Formación sobre los riesgos de inundación durante la etapa escolar	
Item (nº)	Tipo de respuesta
11. ¿Durante tu etapa escolar recibiste algún tipo de información sobre los riesgos de inundación? ¿Podrías citar qué información recibiste?	11. Respuesta cerrada: Si/No. En el caso de respuesta afirmativa debían explicar brevemente la información recibida.
12. Si la respuesta anterior ha sido afirmativa, ¿en qué etapas educativas recuerdas haber recibido estos contenidos?	12. Respuesta cerrada: Educación Primaria/ Educación Secundaria/ Bachillerato
Parte 5. La percepción sobre la aseveración del riesgo de inundación	
Item (nº)	Tipo de respuesta
13. ¿Se están produciendo ahora más inundaciones que cuando ibas al colegio?	13. Respuesta cerrada: Sí/ No/ Ns, Nc. Se dejaba también un espacio para que explicasen su opinión.
14. ¿Qué influencia tienen los siguientes factores en el riesgo de inundación?	14. Los participantes debían puntuar los siguientes factores del 1 al 5 (siendo 5 el más importante): Ordenación del territorio/ Pérdida de la cultura del territorio por parte de la sociedad/ El cambio climático/ Medidas de prevención y emergencia/ Factor educación/ Imprudencia del ser humano (percepción del riesgo "0").
15. ¿Ha cambiado la forma de llover respecto hace unas décadas?	15. Respuesta cerrada a elegir entre: Llueve más cantidad y con mayor intensidad/ Llueve más cantidad y con menor intensidad / Llueve más cantidad pero no ha cambiado la intensidad / Llueve la misma cantidad pero con mayor intensidad / Llueve la misma cantidad pero con menor intensidad / No ha cambiado la forma de llover (ni en cantidad ni intensidad) / Llueve menos cantidad pero con mayor intensidad / Llueve menos cantidad y con menor intensidad / Llueve menos cantidad (pero no ha cambiado la intensidad) / Ns/Nc

Tabla 1. Ítems del cuestionario utilizados para esta investigación. Fuente: elaboración propia.

El cuestionario se administró en una sesión intermedia (primer cuatrimestre) durante la última semana del mes de noviembre y con un tiempo de respuesta de 20 minutos. Este instrumento fue validado por dos investigadores del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimetales y Sociales de la Universidad de Valencia (España) y un investigador del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física de la Universidad de Alicante (España). Finalmente, cabe advertir que todos los participantes respondieron a todas las preguntas y todo este procedimiento se llevó a cabo preservando el anonimato, elaborando listados por número de alumnado y garantizando por escrito el tratamiento confidencial de la información.

3. RESULTADOS

3.1. La formación sobre el riesgo de inundación durante la etapa escolar

En relación con la formación sobre los riesgos de inundación durante la etapa escolar (ítem número 11), sólo el 21,3% (n=17) de los futuros profesores recuerda haber recibido información sobre esta temática. Además, la mayoría de los que respondieron afirmativamente indican que dicha formación había sido muy superficial y era información que procedía de los libros de texto, protocolos de actuación impartidos por la policía o personal de emergencias (bomberos), y explicaciones por el profesor sobre determinados episodios pasados y de la relación de este fenómeno con el clima mediterráneo (la denominada "gota fría") (Tabla 2).

En cuanto al ítem 12, los participantes tenían que identificar en qué etapa escolar recordaban haber recibido alguna instrucción sobre estos fenómenos (los que respondieron en el ítem 11 afirmativamente). Los resultados indican que la mayoría recuerda haber recibido esta información en Educación Secundaria (45,45%; n= 15), seguido de la Educación Primaria (24,24%; n= 8) y, por último, en Bachillerato (15,15%; n= 5).

Procedencia de las explicaciones sobre el riesgo de inundación	Respuestas
Libro de texto	• "La información de los libros de texto" • "Di las inundaciones en asignaturas como Sociales, pero nada más allá de lo que ponía en los libros" • "Sólo lo que se explicaba en los libros de texto" • "Información breve en los libros de Geografía"
Protocolos de actuación	• "Cuando llovía nos daban algunas pautas de prevención" • "Nos dieron medidas de prevención" • "Por parte de la policía. Nos alertaban cuando había riesgo de fuertes lluvias, venían al colegio para informarnos sobre cómo actuar, se hacían simulacros" • "Medidas de prevención" • "Recibí información sobre las causas y consecuencias de una inundación y cómo actuar"
Episodios pasados	• "Información breve sobre inundaciones del pasado" • "La riada de 1957"
Explicación del proceso que generan las inundaciones ("gota fría"	• "Nos explicaron la gota fría y que esto sucede todos los años y que debemos hacer reformas para evitar estos riesgos que siempre han existido en la región mediterránea"

Tabla 2. Categorización de las respuestas de los/as futuros/as docentes que afirmaron haber recibido formación sobre el riesgo de inundación durante la etapa escolar. Fuente: Fuente: Resultados de la encuesta. Elaboración propia.

3.2. ¿Se está incrementado el riesgo de inundación?

En esta parte del cuestionario, las preguntas están orientadas a analizar la percepción que tienen los/as futuros/as maestros/as de Educación Primaria sobre el riesgo de inundación, concretamente: 1) la percepción de si en la actualidad se están produciendo más inundaciones que cuando iban al colegio (ítem 13); 2) la importancia que tienen los factores que inciden en el riesgo de inundación (ítem 14); y 3) la percepción de sí ha cambiado o no la forma de llover en términos de cantidad e intensidad (ítem 15).

Respecto al primero de ellos (ítem nº 13), los resultados indican que el 55,7% (n= 44) cree que ahora se están produciendo más inundaciones, mientras que para el 22,78% la respuesta es negativa (n=18). Significativo resulta, asimismo, los que indican que desconocen la tendencia sobre estos episodios (22,78%; n=18), un número de respuestas casi idéntico al anterior. En relación con la respuesta afirmativa cabe señalar que la gran mayoría de los participantes lo vinculan con el cambio climático ("cuando iba al colegio nunca había inundaciones en el territorio valenciano", "ahora llueve más", "ahora son más agresivas las lluvias", "estos fenómenos se producen más a menudo como consecuencia de la emergencia climática", etc.). En cambio, los segundos (aunque minoritarios), explican que la causa principal de que hayan aumentado las inundaciones no es tanto por el factor peligrosidad (lluvias más frecuentes e intensas), sino por la construcción de determinadas infraestructuras que han cambiado las escorrentías, la ocupación de zonas inundables y por la imprudencia del ser humano ("porque se edifica en muchos casos sin pensar en la seguridad y prevención de riesgos", "las inundaciones también se producen por falta de información y prevención por parte de los ciudadanos", "porque no se dan medidas de prevención, imprudencia del ser humano", etc.). Es decir, se tratan de respuestas que ponen de manifiesto que se ha incrementado la vulnerabilidad y exposición de la población frente a estos peligros.

En cuanto al ítem 14, los resultados corroboran las opiniones observadas en la pregunta anterior ya que los datos obtenidos, por orden de importancia, ponen de manifiesto que en el riesgo de inundación el factor que más influye es el cambio climático (una puntuación de 362) (Figura 1). En segundo lugar, se menciona la "ordenación del territorio" (puntuación de 358), que se entiende cómo la sociedad ha gestionado los usos del suelo (urbanización de zonas inundables, ocupación de cauces, etc.), y, en tercer lugar, se sitúan las "medidas de prevención". Resulta significativo que el factor "educación" ocupe la penúltima posición en orden de importancia por el futuro profesorado (puntuación de 288).

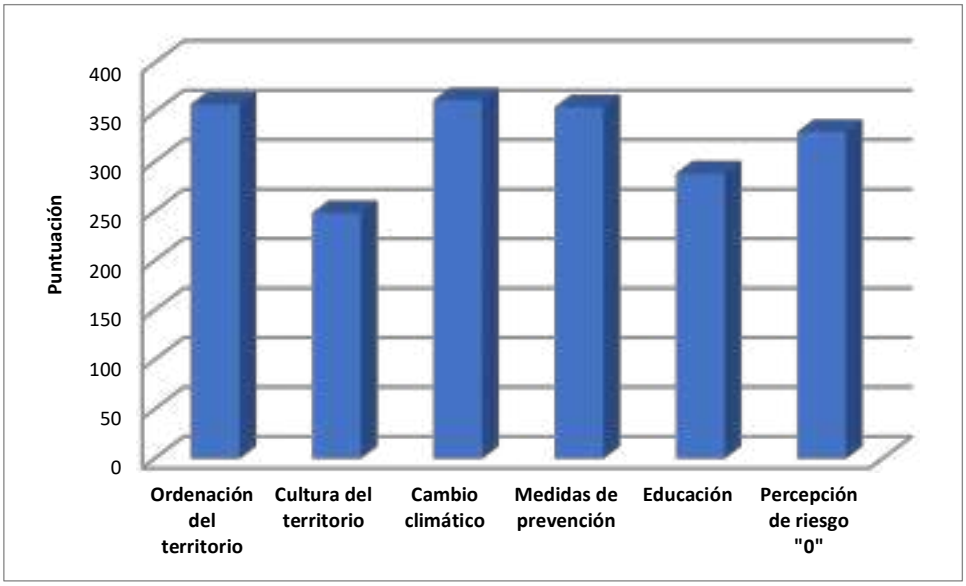


Figura 1. Ítem 14. "¿Qué influencia tienen los siguientes factores en el riesgo de inundación? Fuente: resultados de la encuesta. Elaboración propia. Nota: en este ítem los participantes debían puntuar cada factor, siendo 1 el valor menos importante y 5 el más importante.

En el último ítem de este apartado se preguntaba sobre la percepción de si había cambiado la forma de llover (ítem 15). Los resultados indican que la mitad de los participantes (50,63%; n= 40) piensan que ahora llueve menos (en cantidad), pero con una mayor intensidad (Tabla 3). En segundo lugar,

destacan las respuestas de aquellos que piensan que ahora llueve más cantidad y con una mayor intensidad (30,38%; n= 24). Estos datos indican que los futuros profesores creen que actualmente las precipitaciones registran una mayor intensidad (el 70%). Estas respuestas, en parte, coinciden con los pronósticos futuros que indican los diferentes informes de cambio climático que, para el área mediterránea pronostican una mayor irregularidad. A saber, una reducción de los días de lluvia y una mayor intensidad (IPCC, 2018).

Percepción	%	Nº
Llueve más cantidad y con mayor intensidad	30,38	24
Llueve más cantidad y con menor intensidad	0	0
Llueve más cantidad pero no ha cambiado la intensidad	5,06	4
Llueve la misma cantidad pero con mayor intensidad	2,53	2
Llueve la misma cantidad pero con menor intensidad	0	0
No ha cambiado la forma de llover	0	0
Llueve menos cantidad pero con mayor intensidad	50,63	40
Llueve menos cantidad y con menor intensidad	0	0
Llueve menos cantidad (pero no ha cambiado la intensidad)	3,8	3
Ns/Nc	7,59	6

Tabla 3. Ítem 15. "¿Ha cambiado la forma de llover respecto hace unas décadas? Fuente: Resultados de la encuesta. Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Con esta investigación se ha llevado a cabo una primera aproximación sobre la percepción que tienen los/as futuros/as maestros/as de Educación de Primaria (caso de estudio de la Universidad de Valencia) respecto al riesgo de inundación. En cuanto a las hipótesis de partida, estas se cumplen. La mayoría de los participantes no han recibido formación sobre esta temática en la etapa escolar. Y, en segundo lugar, la percepción que tienen sobre el riesgo de inundación es que se ha agravado en los últimos años, especialmente debido al cambio climático (incremento de la peligrosidad).

El reducido porcentaje de alumnado (el 21,3%) que recibió contenidos sobre esta materia durante su etapa escolar y la escasa importancia dada al factor educación como variable que puede influir en el riesgo de inudación, determina que una de las principales conclusiones derivadas de este trabajo sea que, incrementar el conocimiento sobre esta temática en las cohortes más jóvenes, debe ser una prioridad en la escuela. Ese bajo porcentaje determina, a su vez, que: 1) la identificación de las causas que generan las inundaciones y sus efectos aparezcan asociadas en un porcentaje muy elevado al cambio climático y a los elementos que se asocian a el como el incremento de la torrencialidad de las precipitaciones (es decir, cambio en la forma de llover); y 2) se obvien otros factores como puede ser, por ejemplo, la ocupación de áreas inundables.

Una segunda conclusión es que la falta de conocimiento se ve acentuada por la procedencia de las fuentes de las que obtienen información (internet, mayoritariamente) como indican algunos trabajos (Morote et al., 2019), y la escasa relevancia que los/as futuros/as maestros/as conceden al factor

educación. Esto último resulta de indudable valor ya que denota el escaso interés mostrado por estos participantes. Por tanto, un resultado preocupante, además de un contrasentido teniendo en cuenta que serán ellos los que deberán formar a las cohortes más jóvenes en el futuro.

Una línea de trabajo futura derivada de esta investigación sería fomentar e incidir más en la importancia de trabajar estos temas desde las Ciencias Sociales y, más concretamente, desde Geografía. Esta ciencia debe tener un mayor protagonismo en la formación de los/as maestros/as para incrementar su conocimiento acerca de la interpretación del espacio geográfico, pero también como la ocupación del territorio incide en el riesgo de inundación. También se establecen como retos de investigación futura conocer qué actividades y recursos propondrían los participantes para enseñar esta temática en las aulas. Esto, ayudaría a establecer relaciones en si repiten el mismo tipo de enseñanza (metodologías y recursos) que recibieron durante su etapa escolar. Finalmente, cabe indicar que es necesario establecer una cultura del riesgo, una concienciación y sensibilización sobre los distintos elementos de peligrosidad y vulnerabilidad. Para ello, desde el ámbito educativo se asiste a un enorme reto como es concienciar a las cohortes más jóvenes que, permitiría, a través de la educación ambiental, crear una sociedad más resiliente frente a las inundaciones y los escenarios futuros de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se inserta en el proyecto "Las representaciones sociales de los contenidos escolares en el desarrollo de las competencias docentes" (PGC2018-094491-B-C32) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

REFERENCIAS

- Ahmad, S. y Numan, S.M. (2015). Potentiality of disaster management education through open and distance learning system in Bangladesh Open University. *Turkish Online Journal of Distance Education*, *Vol. 16* (1), 249-260.
- Calvo, F. (2001). *Sociedades y Territorios en Riesgo*. Ediciones Serbal, Barcelona.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) (2019). *Economic Losses, Poverty & Disasters (1998-2017)*. Disponible en: https://www.emdat.be/. [Consulta: 11 de febrero de 2020].
- Centros de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (2017). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España.* Centro de Estudios Hidrográficos. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Díez, A. (2015). Buscando riadas en los árboles: Dendrogeomorfología. E*nseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, *vol. 23* (25), 272-285.
- European Environment Agency (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*. An indicator-based report, Luxemburgo. Disponible en https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016 [Consulta: 29 de julio de 2019].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). *Special Report Global warming of 1.5ºC*. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/sr15/. [Consulta: 9 de noviembre de 2019].
- Lechowicz, M. y Nowacki, T. (2014). School education as an element of natural disaster risk reduction. *Prace i Studia Geograficzne*, 55, 85-95.
- McWhirter, N. y Shealy, T. (2018). Case-based flipped classroom approach to teach sustainable infrastructure and decision-making. *International Journal of Construction Education and Research*, 1-21.

- Morote, A.F. (2017). El Parque Inundable La Marjal de Alicante (España) como propuesta didáctica para la interpretación de los espacios de riesgo de inundación. *Didáctica Geográfica*, 18, 211-230.
- Morote, A.F. (2019a). La enseñanza del cambio climático en la Educación Primaria. Exploración a partir de las representaciones sociales del futuro profesorado y los manuales escolares de Ciencias Sociales. *ENSAYOS, Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, *vol. 34*(2), 213-228.
- Morote, A.F. (2019b). Percepción de los futuros maestros de Primaria sobre el riesgo de inundación. La Geografía como herramienta para lograr una sociedad más resiliente al cambio climático. *Papeles de Geografía*, 65, 67-88. http://dx.doi.org/10.6018/geografia.366341.
- Morote, A.F. y Pérez, A. (2019). La comprensión del riesgo de inundación a través del trabajo de campo: Una experiencia didáctica en San Vicente del Raspeig (Alicante). *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 19, 609-631.
- Morote, A.F., Campo, B.A. y Colomer, J.C. (2019). La percepción del cambio climático en los futuros docentes de Educación Primaria. Una experiencia de conocimientos previos a partir de la enseñanza de las Ciencias Sociales. En AGE y Universidad de Valencia. *Crisis y espacios de oportunidad. Retos para la Geografía* (106-120). Universidad de Valencia, Valencia.
- Olcina, J. (2018). Verdades y mentiras sobre el riesgo de inundaciones en el litoral mediterráneo: balance de medio siglo. *Jornada sobre fenómenos meteorológicos extremos en el mediterráneo*. 11 de diciembre de 2018. AEMET, Valencia.
- Pérez, A., Gil, S. y Olcina, J. (2015). Housing bubbles and the increase of flood exposoure. Failures in flood risk management on the Spanish south-eastern coast (1975-2013). *Journal of Flood Risk Management*. http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12207
- Plan de Acción Territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) (2015). Disponible en: http://www.habitatge.gva.es/es/web/planificacion-territorial-e infraestructura-verde/patricova-docs. [Consulta: 20 de febrero de 2020].
- Souto, X. M. (2018). La geografía escolar: deseos institucionales y vivencias de aula". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 79, 1-31. http://dx.doi.org/10.21138/bage.2757.
- Universidad de Valencia (2020). *Anuario estadístico.* Disponible en: https://webges.uv.es/MS10/servlet/mstrWeb?evt=3010&Server=MSTRATEGY&Project=RECULL&. [Consulta: 21 de febrero de 2020].

EL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO Y LA EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN

Patricia Fernández Aracil
Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales,
Universidad de Alicante, España
patricia@ua.es
https://orcid.org/0000-0001-6299-2680

RESUMEN

El análisis coste-beneficio es un procedimiento que sirve para comparar posibles decisiones alternativas de inversión o acción en función de los beneficios netos que se pueden obtener, así como para informar a los decisores sobre la conveniencia social de un proyecto, una política o una acción determinada, pues es reconocido como técnica de valoración apropiada para el análisis de la eficiencia económica en la asignación de recursos y permite la integración de impactos ambientales con los financieros, dada la necesidad de expresar esos impactos en términos monetarios, posibilitando su comparación homogénea. Así, en el presente trabajo se expone esta metodología de análisis como herramienta útil para la evaluación económica y financiera, tanto *ex ante*, como *ex post*, de un proyecto que pueda verse afectado por los riesgos derivados de una inundación.

1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO

Las actuaciones políticas bien fundamentadas y exitosas requieren tomar decisiones de inversión, en ocasiones de gran magnitud, que precisan servirse de criterios objetivos y contrastables. Así, la Unión Europea lanzó en el año 2008 su Guía para el Análisis Coste-Beneficio de Proyectos de Inversión —Guide to Cost-Benefit Analysis (CBA) of investment projects— edición actualizada por el documento vigente en la fecha de redacción de este trabajo, que cubre el período de programación de financiación europea comprendido entre 2014 y 2020 en cuanto a su política de cohesión. El próximo período de financiación, 2021-2027, dispondrá de una edición actualizada de dicha guía.

De esta forma, se homogeneiza la metodología seguida a escala europea para averiguar la respuesta a una serie de cuestiones fundamentales en materia de evaluación de proyectos: cuándo una inversión pública va a resultar positiva para las arcas públicas o para el beneficio de la sociedad en su conjunto, hasta qué punto hay que ejecutar nuevas infraestructuras o quiénes deben ser los agentes que puedan financiarlos, considerando sector público, sector privado y su colaboración público-privada.

No obstante, siempre hay que tener presente que la valoración económica y financiera (después ahondaremos en esta distinción conceptual entre "lo económico" y "lo financiero") no es la respuesta última ante la toma de decisiones: se trata de una herramienta útil y complementaria en la formulación de políticas tendentes al desarrollo sostenible.

Aunque existen otras metodologías de análisis de proyectos, el análisis coste-beneficio (ACB, en adelante) es un procedimiento que sirve para comparar posibles decisiones alternativas de inversión o acción en base a los beneficios netos que se pueden obtener. Los economistas apuestan por la utilización del ACB a la hora de informar a los decisores sobre la conveniencia social de un proyecto, una política o una acción determinada, pues es reconocido como técnica de valoración apropiada para

el análisis de la eficiencia económica en la asignación de recursos y permite la integración de impactos ambientales con los financieros, dada la necesidad de expresar esos impactos en términos monetarios, posibilitando su comparación homogénea (De Rus, 2008).

Así, hablando en términos económicos, un ACB es, a fin de cuentas, un análisis del coste de oportunidad de una determinada decisión frente a otra. El coste de oportunidad es el valor de la mejor alternativa posible a la que se renuncia para llevar a cabo una acción o decisión económica. Se refiere a aquello de lo que un agente se priva o renuncia cuando hace una elección o toma de una decisión.

2. METODOLOGÍA GENERAL DEL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO

Como adelantábamos anteriormente, la evaluación de un proyecto puede abordarse desde dos perspectivas distintas: la económica, considerando los beneficios y costes que éste aporta a la sociedad en su conjunto; o bien, la financiera, centrada únicamente en los ingresos y costes generados por el proyecto (para el agente financiador, ya sea público o privado).

Ambas perspectivas necesitan que sea calculado, previa toma de decisiones, un indicador numérico que permita determinar la idoneidad del proyecto. Es posible utilizar diversos indicadores (Molina-Giménez & Fernández-Aracil, 2017), siendo el más utilizado el conocido como VAN (valor actual neto, conocido también por sus siglas en inglés, *NPV, net present value*): se comparan los ingresos obtenidos con los gastos producidos, considerando una corrección por el valor temporal del dinero. Es decir, por ejemplo, si alguien nos pide prestados 500 € y nos garantiza que el año que viene nos devuelve 550 €, eso implica que 500 € de hoy equivalen a 550 € del año que viene. Seguidamente, se expone la formulación matemática base en esta metodología. No obstante, hay software específico, así como funciones Excel que facilitan el cálculo. El VAN permite homogeneizar beneficios y costes de un proyecto en un punto de referencia determinado por el evaluador, siendo normalmente el período inicial t = 0 y considerando las siguientes variables:

$$VAN = -I + \frac{B_1}{(1+i)} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \frac{B_3}{(1+i)^3} + \cdots + \frac{B_n}{(1+i)^n}$$

B = Ingresos – costes
I = Inversión inicial
i = Tasa de actualización o de descuento
n = Vida útil infraestructura u horizonte de tiempo

Por otro lado, la TIR (tasa interna de retorno) es el valor de la tasa de descuento (i) que iguala a cero el valor actual neto de un proyecto. El indicador denominado TIR (también conocido como tasa interna de rentabilidad) es aquel valor de la tasa de actualización que hace que sea cero el flujo de fondos acumulado al final del proyecto, siendo una alternativa al VAN para determinar la rentabilidad de un proyecto. Se consideran aceptables aquellos proyectos que presentan una TIR superior a un valor mínimo (la socialmente aceptada debido a las condiciones de mercado y a la estabilidad económico-financiera de los países). Otra posibilidad es utilizar el indicador RBC (ratio beneficio-coste), en el cual se establece un cociente entre los ingresos del proyecto y sus costes, resultando, en general, aceptable un proyecto cuando dicho cociente (RBC) es mayor que 1. Si el cociente entre ingresos y costes se calculara a la inversa (RCB, ratio coste-beneficio), el criterio de aceptación también se invertiría, resultando aceptable un proyecto cuando el cociente es menor que 1.

Para calcular los ingresos y los costes que un determinado proyecto o política, hay que conocer previamente durante qué período se va a realizar ese cálculo, que se denomina vida útil u horizonte de tiempo. Por ejemplo, si se desea analizar la viabilidad económico-financiera de una infraestructura

de transporte, el período de cálculo del ACB sería de 30 años, atendiendo a los períodos de referencia establecidos en la guía europea (Comisión Europea, 2015).

Si consideramos un proyecto de infraestructura ferroviaria de alta velocidad (AVE), tendremos que estimar esos costes e ingresos durante un período de 30 años, pudiendo considerar como "año cero" aquél en el cual se produce la expropiación de los terrenos para su construcción, por suponer el primer coste. Recordamos en este punto que estos cálculos durante 30 años deben hacerse desde dos perspectivas: la financiera y la económica. Los flujos monetarios para considerar en cada una de estas dos perspectivas son los expuestos en la Tabla 1, continuando con el ejemplo de un proyecto de una nueva línea ferroviaria donde antes no había construida ninguna otra línea de ferrocarril, pero sí se permitía el transporte por carretera. Como se observa, el análisis económico contempla una serie de ingresos derivados del ahorro en determinadas externalidades negativas del sector del transporte, que aparecen cuando empresas o individuos generan costes o beneficios que afectan a otros agentes de la sociedad, y estos costes o beneficios no son compensados. Esta es la diferencia fundamental con el análisis meramente financiero: la consideración del beneficio para la sociedad en su conjunto.

Costes en el análisis financiero	**Costes en el análisis económico**
Obra civil: expropiaciones, compra de suelo y ejecución de infraestructura. Adquisición material móvil o rodante. Operación ferroviaria: personal, combustible o mantenimiento. Mantenimiento infraestructura. Valor residual (-): una vez finalizado el período de 30 años estipulado para el análisis, quedará una maquinaria que es posible vender, o un suelo que (hipotéticamente), se podría comercializar de nuevo, una vez desmantelada la infraestructura. Se debe incluir en el apartado de los costes, aunque con signo negativo.	Obra civil, afectada por coeficiente de precios sombra. Adquisición material móvil o rodante, afectada por coeficiente de precios sombra. Mantenimiento infraestructura, afectado por coeficiente de precios sombra. Valor residual (-), afectado por coeficiente de precios sombra.
Ingresos en el análisis financiero	**Ingresos en el análisis económico**
Títulos de transporte: venta de billetes de tren. También puede haber otros ingresos, por ejemplo, los publicitarios, pero aquellos derivados de la venta de títulos de transporte serían los principales, en este caso.	Excedente del consumidor: ahorros de tiempo de los nuevos viajeros. Excedente del productor: incremento de tarifas y del número de viajeros entre dos puntos. Ahorros derivados de las externalidades evitadas por la transferencia modal desde la carretera: accidentes de tráfico, niveles de ruido, congestión, biodiversidad, contaminación, emisión de gases efecto invernadero (para distancias medias y largas, el tren es menos contaminante por pasajero y por kilómetro recorrido que el vehículo privado).

Tabla 1. Flujos monetarios que es necesario calcular en un ACB económico y financiero. Fuente: elaboración propia basada en CNIT & CSIL (2012) y en Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Cedex (2010).

Como se puede deducir, tanto los ingresos como los costes responden a estimaciones de la demanda real que tendrá esa nueva infraestructura de transporte. Por ejemplo, para el cálculo de los ingresos que generará cada año del cálculo una nueva infraestructura de alta velocidad, precisamos conocer el precio de los títulos de transporte y el número de viajeros que la utilizarán. Pero, ¿cuántos viajeros tendrá la nueva línea ferroviaria? Resolver esta cuestión sigue siendo una tarea muy complicada de

abordar. Existen modelos matemáticos que nos ayudan a estimar ese número de usuarios de un proyecto, pero los errores siguen siendo muy sustanciales en ocasiones (debido, en gran medida, a deficiencias en los análisis de riesgos).

Una vez detectados los ingresos y costes que tendría una infraestructura, el paso siguiente es calcular su diferencia para el conjunto de la vida útil (la suma de flujos de ingresos menos la suma de flujos de costes, con su valor monetario homogeneizado en el tiempo), de modo que un resultado positivo nos indicará que la infraestructura es rentable y, por tanto, se aconsejaría su ejecución; ante un resultado negativo de esa diferencia, no se recomendaría su ejecución (Figura 1). El indicador que mide esta diferencia entre ingresos y costes es el Valor Actual Neto o VAN, y representa una cantidad monetaria (euros, en este caso). Dicha diferencia debe calcularse desde el punto de vista financiero y desde el punto de vista económico (contando con la sociedad en su conjunto):



Figura 1. Resultado de un proyecto desde el punto de vista de la toma de decisiones ante el cálculo de su VAN social (ACB económico) y su VAN financiero. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2015).

Para dilucidar quién ha de sufragar la financiación de un nuevo proyecto, se deben tener en cuenta los siguientes posibles resultados, interpretando la Figura 1:

I. El Análisis Coste-Beneficio financiero es positivo. Puesto que una empresa conseguiría beneficios por sí misma, el proyecto puede seguir adelante pero no se debe financiar con fondos públicos, al resultar rentable por sí solo.
II. El Análisis Coste-Beneficio financiero es negativo. Entonces, seguidamente ha de tenerse en consideración el resultado del análisis ACB económico. Así, el nuevo proyecto se podría financiar con fondos públicos parcialmente, hasta la cantidad económica que permita que la entidad financiadora consiga un beneficio razonable, siempre y cuando el resultado del ACB económico fuese positivo.
III. El Análisis Coste-Beneficio social es positivo. Se recomienda ejecutar la alternativa con mayor del VAN y es posible financiarla con fondos públicos, ya que se ha demostrado con los cálculos del ACB social que la sociedad estaría mejor con el nuevo proyecto.
IV. El Análisis Coste-Beneficio social es negativo. En este caso, no se aconseja ejecutar la infraestructura, la sociedad está mucho mejor sin ese nuevo proyecto.

3. EL ANÁLISIS DE RIESGOS DEL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO

En los epígrafes anteriores se ha descrito la metodología para evaluar los proyectos de inversión de infraestructuras diferenciando entre el Análisis Coste-Beneficio (ACB) social o económico y el financiero o empresarial. Así, la última fase para poder dar por finalizada la evaluación de un proyecto es el análisis de riesgos, pues algunos acontecimientos tales como una crisis global, la incorrecta estimación de la demanda para una nueva infraestructura de transporte, un fenómeno natural devastador o variaciones en los precios considerados para los recursos (por ejemplo, el combustible)…pueden modificar sustancialmente los resultados de un determinado proyecto. Estos errores en las estimaciones son muy habituales, incluso con los costes de expropiación de los terrenos, sujetos a gran variabilidad. Para ello, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad o de riesgos en el que se barajan diferentes hipótesis relativas a las estimaciones de las partidas más importantes de un determinado proyecto, tanto de en cuanto a los ingresos como en cuanto a los costes.

Así, en proyectos de infraestructuras de transporte es habitual que, en la parte de costes, los relativos a la ejecución puedan incrementarse significativamente, mientras que, en la parte de los ingresos, las variaciones más significativas provengan de la reducción tanto de la demanda de transporte como de crisis económicas imprevistas o cambios en el precio de los inputs (combustible o electricidad, esencialmente). En este análisis de sensibilidad, se estima cuánto tendrían que incrementarse o reducirse cada una de partidas por separado para que el proyecto ya no fuera rentable socialmente. Con ello, se apreciaría cuál de las partidas calculadas (de costes o ingresos) es la que más riesgo entraña para que el proyecto ya no sea rentable socialmente, lo que llevaría a vigilar especialmente la estimación de esa partida para conseguir esa rentabilidad social.

4. LOS RIESGOS NATURALES Y EL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO

La inclusión o consideración de los riesgos naturales en un ACB puede materializarse desde diversas perspectivas. Por un lado, la previsión de un riesgo natural puede insertarse en un ACB en su última fase, denominada análisis de riesgos. Por otro lado, puede analizarse propiamente la viabilidad de las medidas de mitigación de riesgos a través de la herramienta del ACB, lo que será estudiado en el siguiente epígrafe.

La consideración de un riesgo natural en un ACB se establece mediante la incertidumbre externa asociada a un proyecto, ya que existen contingencias impredecibles cuya ocurrencia afecta al flujo de beneficios y costes. Así, la incertidumbre de un proyecto puede ser de dos tipos: interna al proyecto (la derivada de construir una infraestructura cuando se presentan dificultades inesperadas en el terreno que encarecen la obra, por ejemplo) o externa al proyecto (como podría ser una huelga general o una catástrofe natural).

Desde el momento en el cual consideramos la incertidumbre asociada a proyectos, podemos adoptar tres tipos de decisiones:

A. Ignorar la incertidumbre: puede adoptarse cuando la magnitud de la incertidumbre sea reducida, el riesgo de equivocarse sea mínimo o tenga un coste bajo para el evaluador.
B. Incorporar la incertidumbre mediante análisis de sensibilidad o de riesgos, planteando diferentes escenarios: los resultados de la evaluación varían al modificarse determinados parámetros de esta. El evaluador debe repetir su ACB con los distintos valores posibles de dichos parámetros.
C. Incorporar la incertidumbre en las herramientas de decisión: a partir de la información disponible sobre el rango de valores y/o la distribución de probabilidad que pueden tomar esos parámetros. En definitiva, el evaluador tendría unos valores probables para cada ingreso o coste sujeto a incertidumbre, lo que se trasladaría a los flujos de beneficios y se obtendrían

distribuciones de probabilidad del VAN, es decir no se obtendría un solo resultado numérico para el VAN, sino un rango de valores posibles y las probabilidades de que dichos valores ocurran.

Si se opta por incorporar en el ACB la incertidumbre asociada a un proyecto, los pasos recomendados por la Comisión Europea (2015) a la hora de evaluar los riesgos son cuatro, descritos en los siguientes subapartados.

4.1. Análisis de sensibilidad

Permite la identificación de las variables críticas del proyecto mediante el cálculo del valor variables críticas para VAN=0. Se plantean diferentes escenarios, combinando valores de variables críticas desde perspectivas optimistas y pesimistas. En el caso de obtener VAN>0 en escenario pesimista, se puede concluir que el riesgo del proyecto es bajo. Las variables críticas son aquellas que provocan una variación del VAN superior al 1% cuando la variación de la propia variable es de +1% o -1%. El análisis de sensibilidad finaliza con el cálculo del valor las variables críticas para un valor de VAN=0, así como con el planteamiento de los diferentes escenarios mediante la combinación de los valores de variables críticas desde perspectivas tanto optimistas, como pesimistas. En el caso de obtener VAN>0 (positivo) en un escenario pesimista, se puede concluir que el riesgo del proyecto es bajo.

4.2. Análisis cualitativo de los riesgos

Consiste en elaborar un listado de acontecimientos adversos a los cuales el proyecto está expuesto, así como una matriz de riesgos para cada acontecimiento adverso, indicando: las posibles casusas de que ocurra, su vinculación con el análisis de sensibilidad, los efectos negativos generados en el proyecto, la probabilidad de ocurrencia (P), la severidad (S) de cada impacto (aspectos del factor peligrosidad) y el nivel de riesgo. La interpretación de la matriz de riesgos debe incluir la evaluación de los niveles aceptables de riesgo. Además, en la descripción de las medidas de mitigación o prevención de los principales riesgos, es preciso indicar quién es responsable de aplicar las medidas para la reducción de la exposición al riesgo, cuando se consideren necesarias. La probabilidad de ocurrencia de un riesgo (P) se mide en una escala desde la "A" hasta la "E", siendo "A" muy improbable y "E" muy probable. Por otro lado, los niveles de severidad se miden en una escala del I al V:

I. Sin efecto relevante sobre el bienestar social, incluso sin acciones correctivas.
II. Pérdidas menores sobre el bienestar social, afectando mínimamente al proyecto. Se precisan acciones correctivas.
III. Moderada: pérdidas sobre el bienestar social, mayoritariamente financieras, en el medio-largo plazo. Puede que sirvan acciones correctivas.
IV. Crítica: grandes pérdidas en el bienestar social. La función principal del proyecto se ve afectada. Las acciones correctivas no son suficientes para evitarlo.
V. Catastrófica: fallo total del proyecto y sus funciones en el medio-largo plazo.

Del producto de la probabilidad por la severidad, se obtiene el nivel de riesgo a través de la matriz de riesgos, a partir de la cual poder identificar las medidas de mitigación o prevención en función del nivel de riesgo.

4.3. Análisis probabilístico de los riesgos

Se considera preciso si el nivel de riesgo evaluado cualitativamente es alto o muy alto tras la implementación de medidas correctivas. Consiste en asignar una distribución de probabilidad para cada una de las variables críticas para así recalcular los valores esperados del VAN o la TIR (generalmente se realiza mediante método de Monte Carlo, que es posible implementar en software específico). Las distribuciones de probabilidad de las variables se determinan adecuadamente, por ejemplo, en base a experiencias recogidas en proyectos pasados. Como fuentes de datos pueden

utilizarse datos experimentales, tendencias históricas, casos análogos ya estudiados o consultas a expertos (el denominado método Delphi).

4.4. Prevención y mitigación de riesgos

Se debe incluir en el ACB el coste de implementar las medidas precisas para evitar o mitigar los posibles riesgos que afectan a la rentabilidad del proyecto, ya sea desde el punto de vista económico o financiero. Si se considera preciso adoptar medidas que acarrean costes adicionales a los inicialmente previstos en el ACB, dichos costes deben insertarse en el ACB, repitiéndolo desde el principio, aunque ahora con la diferencia de haber considerado la mitigación de riesgos en el proyecto. El coste de las medidas de prevención o mitigación de riesgos se suele incluir en las partidas de costes de inversión o en los costes de operación y mantenimiento. Esto incluye los riesgos vinculados a desastres naturales u otros eventos indeseables similares, que deben ser cubiertos en el diseño técnico del proyecto o adecuadamente asegurados.

5. EL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO DE LA MITIGACIÓN DE RIESGOS NATURALES

La ya citada *Guide to Cost-Benefit Analysis (CBA) of investment projects* (Comisión Europea, 2015) incluye una serie de objetivos clave en la política de cohesión, así como en el marco de adaptación al cambio climático, que son susceptibles de implementar proyectos que precisen financiación europea (cuyo ACB sería preceptivo, con algunas particularidades para tener en cuenta) y están enmarcados en alguna de las siguientes categorías:

A. Recuperación de sitios contaminados, como masas de agua, desechos peligrosos o vertederos radiactivos.
B. Conservación de recursos naturales, incluyendo la protección de ecosistemas y su biodiversidad, como protección, regeneración de zonas costeras, playas, bosques, parques naturales o áreas protegidas.
C. Reducción de la vulnerabilidad y la exposición a riesgos naturales, como por medio de la rehabilitación hidráulica de ríos para reducir posibles impactos de inundaciones. Los principales riesgos incluyen tanto los fenómenos meteorológicos (tormentas, fenómenos de temperatura extrema, sequías, inundaciones, incendios en bosques), como los riesgos geofísicos (avalanchas, deslizamientos de tierra, terremotos, volcanes).

Antes de emprender un ACB de un proyecto de estas características, es preciso realizar una contextualización previa del ámbito de estudio (factores socioeconómicos, políticos, institucionales, regulatorios, ambientales y técnicos), así como definir y cuantificar quién se beneficiará de la intervención (tanto usuarios como no usuarios). Esto es particularmente importante para los proyectos de prevención de riesgos naturales, pues el promotor del proyecto debe analizar cuidadosamente las principales características estructurales de las áreas para las que se reduce el riesgo natural después de la implementación del proyecto. Esto incluye la cuantificación de las superficies afectadas y del número de habitantes y edificios que estarán sujetos al riesgo (es decir, datos de uso del suelo, en la medida de lo posible detallados y desglosados por su uso residencial, comercial, industrial, turístico, etc.), antes y después de que el proyecto sea implementado. Algunas de las características especiales de esta tipología de proyectos se describen en los siguientes apartados en función de la fase del ACB en la cual nos encontremos: análisis financiero, análisis económico o análisis de riesgos.

5.1. Análisis financiero

En las partidas de costes de inversión, mantenimiento y operación del proyecto, debemos considerar además del coste de las infraestructuras, el coste de los componentes blandos, tales como: acciones institucionales, gestión de inundaciones, medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, asistencia técnica auxiliar o sistemas de monitorización y control. En cuanto a la estimación de los

ingresos financieros, éstos no existen en el caso de abordar proyectos de prevención de riesgos naturales (categoría C). En los otros dos casos (categorías A y B), sí deben considerarse, por ejemplo, los siguientes ingresos:

- La renta de un bien natural restaurado para la prestación de servicios relacionados con el ocio (por ejemplo, bañarse, pescar, cazar).
- La venta o alquiler de terrenos rehabilitados para zonificación residencial, industrial o agrícola.
- Las entradas pagadas por los visitantes de un parque natural o de una zona protegida, en su caso.

5.2. Análisis económico

Los ingresos que pueden considerarse desde el punto de vista social, dependiendo de la categoría de proyecto, son:

- La mejora de las condiciones de salud: se pueden cuantificar en términos de fallecimientos y enfermedades evitados (gracias a los cálculos del valor probabilístico de la vida). En el caso de riesgos naturales, no es posible predecir cuándo ocurrirá el desastre y con qué intensidad, por lo que los beneficios estimados a partir de las pérdidas evitadas son probabilísticos. De ahí se deriva la importancia de la fiabilidad de las fuentes de datos consultadas y la calidad de las series históricas de datos.
- El nuevo uso productivo de los terrenos: puede estimarse a través de su valor de mercado si el suelo espera ser vendido o alquilado; o bien, en base a transacciones reales del mercado aledaño, mediante casos análogos de ventas ya materializadas.
- El incremento del valor en cuanto a su uso recreativo: si el proyecto repercute en el incremento del precio de entradas pagadas por los visitantes de un parque natural o de una zona protegida.
- La conservación de los ecosistemas y su biodiversidad: se corresponde con su valor de no uso, como el valor de su existencia (belleza escénica) o el valor de legado (por la biodiversidad como herencia para nuestra descendencia).
- Los ahorros derivados de la reducción en los daños materiales a las propiedades: beneficios derivados del desarrollo de sistemas o herramientas de mapeo, evaluación y detección del riesgo, así como de infraestructuras para su prevención y mitigación. Como aproximación, pueden emplearse las primas de las compañías de seguros.
- El incremento del valor de mercado de los terrenos: se fundamenta en que la gente prefiere evitar vivir en lugares donde un desastre natural puede suceder.

La valoración monetaria de estos ingresos requiere de la utilización de métodos de valoración complementarios al ACB, como pueden ser: métodos de preferencias declaradas o reveladas, el método del coste del viaje, la utilización de valores de mercado o el método de los precios hedónicos, entre otros. No obstante, no todos los beneficios son relevantes para todos los proyectos. Es necesario establecer cuáles se pueden atribuir justificadamente y se pueden considerar beneficios adicionales, siempre y cuando no se computen dos veces.

5.3. Análisis de riesgos

Las principales categorías que deben ser consideradas en la fase de análisis de riesgos de un ACB, si estamos evaluando proyectos referidos a recuperación de sitios contaminados, conservación de recursos naturales o reducción de la vulnerabilidad y la exposición a riesgos naturales, son las siguientes:

- Factores políticos o regulatorios inesperados para el proyecto.
- Encuestas e investigaciones inadecuadas con el consiguiente diseño técnico inadecuado.
- Información inadecuada respecto a los registros históricos de desastres.
- Subestimación de la frecuencia natural de riesgo o probabilidad de ocurrencias de desastres.
- Subestimación de los efectos del cambio climático.
- Retrasos en los trámites (licencias) o en la construcción.

- Quiebra del contratista o falta de recursos.
- Costes de inversión y/o mantenimiento no previstos.

6. LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN

Tanto las medidas de adaptación estructurales, como las soluciones basadas en la naturaleza plantean dificultades a la hora de implementarse porque, habitualmente, requieren grandes inversiones iniciales y sus beneficios a largo plazo son inciertos, lo que provoca que la toma de decisiones en ese sentido pueda conllevar elecciones irreversibles e ineficientes (Aerts et al., 2014). La medida de la efectividad económica y financiera de la mitigación de los riesgos de inundación requiere, al menos, de su cuantificación ante tres escenarios: en ausencia de medidas, aplicando medidas de mitigación, o realizando aquellas inversiones mínimas para lograr un nivel aceptable residual del riesgo (Arrighi et al., 2018). La evaluación de los daños causados por inundaciones se deriva en la aplicación de curvas de daños por etapas que vinculan la profundidad o calado de la inundación con sus consecuencias adversas (Scawthorn et al., 2006).

Recientemente, algunos autores han implementado nuevos parámetros comparativos a la hora de aplicar la metodología ACB analizando la eficiencia de las medidas de mitigación de riesgos, siempre precisando una perspectiva multidisciplinar y con el objetivo de sistematizar el análisis, como pueden ser: la ratio riesgo-coste, tanto en cuanto a la aplicación de medidas estructurales, como aquellas no estructurales (Garrote et al., 2019); el índice de gestión del riesgo de desastres (Lantada et al., 2020); o el índice de capacidad de recuperación socioeconómica ante el riesgo (Moura Rezende et al., 2020).

En paralelo, a la hora de considerar los riesgos de inundación en un ACB, es preciso trabajar con las series de datos existentes sobre fenómenos hidrometeorológicos extremos en un determinado contexto geográfico. Así, surgen múltiples interpretaciones estadísticas y probabilísticas para el tratamiento de dichas series temporales considerando diferentes períodos de retorno, sujetas a características estadísticas tales como la estacionariedad. Algunos enfoques actuales apuestan, sin embargo, por integrar funciones de distribución probabilística no estacionarias obteniendo resultados más precisos (Qi, 2017). También, las series temporales juegan un papel protagonista en los registros de evaluación de daños, cuyas metodologías de evaluación de pérdidas constituyen una herramienta complementaria a la hora de sentar las bases y establecer los datos de partida para abordar un determinado ACB (UN ECLAC, 2014).

7. CONSIDERACIONES FINALES

En la investigación llevada a cabo por Shreve y Kelman (2014) se compilan y comparan diversos proyectos reales de implementación de medidas de mitigación de riesgos naturales, para los cuales se ha realizado un ACB sirviéndose del indicador RBC (ratio beneficio-coste). Como conclusión general del trabajo se deriva que no hay consenso en cuanto a cómo debe ser abordado el ACB respecto a los riesgos naturales, cuáles son las variables que incluir o cómo tratar con sus limitaciones. Además, de la citada investigación se derivan algunas cuestiones interesantes como, por ejemplo: las medidas para mitigar desastres, ¿han de tener necesariamente un RBC favorable?; o bien, si se implementan medidas de reducción del riesgo dentro de una propiedad privada, pero no se manifiesta ninguna inundación durante la vida útil de la infraestructura ¿ha resultado provechoso implementar esas medidas?

Dejando estas preguntas para la reflexión, muy vinculadas con la dualidad del ACB, considerando su vertiente financiera y su vertiente económica o social, otra cuestión importante se deriva de cómo elegir adecuadamente una determinada tasa de descuento en el análisis económico. En ese sentido, a partir de Shreve y Kelman (2014) se puede concluir que en proyectos ambientales debe aplicarse una

tasa de descuento muy baja o igual a cero, pues proteger el medio para las generaciones futuras debe tener más valor que protegerlo hoy.

A pesar de las limitaciones que pueda tener un ACB, debemos considerar su utilización como una poderosa herramienta cuya principal fortaleza es proveer de un marco de análisis riguroso y sistemático que contribuya con la adecuada toma de decisiones.

REFERENCIAS

- Aerts, J. C. J. H., Botzen, W. J. W., Emanuel, K., Lin, N., de Moel, H. & Michel-Kerjan, E. O. (2014). Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities, *Science* (80)344, 473–475.
- Arrighi, C., Rossi, L., Trasforini, E., Rudari, R., Ferraris, L., Brugioni, M., Franceschini, S. & Castelli, F. (2018). Quantification of flood risk mitigation benefits: A building-scale damage assessment through the RASOR platform. *Journal of Environmental Management*, 207, 92–104. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.017
- CENIT, Centre for Innovation in Transport, & CSIL, Centre for Industrial Studies, Milan (2012). *The Mediterranean Corridor*. European Commission, Directorate-General Regional Policy Policy Development Evaluation, Barcelona.
- Comisión Europea. (2015). *Guide to Cost-Benefit Analysis of investment projects* (Economic appraisal for Cohesion Policy, 2014-2020). Directorate General Regional Policy. https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cba_guide_cohesion_policy.pdf
- De Rus, G. (2008). *Análisis coste-beneficio: evaluación económica de políticas y proyectos de inversión*. Editorial Ariel.
- Garrote, J., Bernal, N., Díez-Herrero, A., Martins, L.R. & Bodoque, J.M. (2019). Civil engineering works versus self-protection measures for the mitigation of floods economic risk. A case study from a new classification criterion for cost-benefit analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 37, 101157. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101157
- Lantada, N., Carreño, M. L. & Jaramillo, N. (2020). Disaster risk reduction: A decision-making support tool based on the morphological analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, 101342. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101342
- Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Cedex. (2010). *Evaluación económica de proyectos de transporte*.
- Molina-Giménez, A. & Fernández-Aracil, P. (2017). Herramientas para la gestión territorial sostenible del agua. http://dx.doi.org/10.14198/MOOC.GESTAGUA.2017
- Moura Rezende, O., Ribeiro da Cruz de Franco, A.B., Krishnamurti Beleño de Oliveira, A., Martins Miranda, F., Pitzer Jacob, A. C., Martins de Sousa, M. & Gomes Miguez, M. (2020). Mapping the flood risk to Socioeconomic Recovery Capacity through a multicriteria index. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120251. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120251
- Qi, W. (2017). A non-stationary cost-benefit analysis approach for extreme flood estimation to explore the nexus of 'Risk, Cost and Non-stationarity'. *Journal of Hydrology*, 554, 128–136. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.009
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C., Lawrence, M. (2006). HAZUS-mh flood loss estimation methodology. I: overview and flood hazard characterization. Natural Hazards Review, 7, 72–81. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(72)
- Shreve, C. M. & Kelman, I. (2014). Does mitigation save? Reviewing cost-benefit analyses of disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, 213–235. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.08.004
- UN ECLAC (2014). *Handbook for Disaster Assessment*. UN ECLAC, UN, Chile.

ECONOMIA CIRCULAR: A REUTILIZAÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS NO SETOR URBANÍSTICO COMO BENEFÍCIO DO TURISMO NACIONAL

Joline Picinin Cervi
Universidade de Passo Fundo, Brasil
jolinepcervi@gmail.com
http://lattes.cnpq.br/2240665869521952

RESUMO

Durante o desenvolvimento deste estudo pretende-se demonstrar a ideia de economia circular como forma de repensar o manejo e a utilização dos recursos hídricos, visto a necessidade deste recurso para todas formas de vida. Outrossim, no decorrer deste pretende-se discorrer sobre a economia circular, uma vez que está vem se demonstrando um pilar indispensável para um desenvolvimento sustentável, pois mantém por mais tempo os recursos em circulação, reutilizando-os sempre que possível. Por isso, este estudo busca encontrar os melhores meios de aproveitamento das águas residuais, em especial no setor urbanístico, de modo que a sociedade não venha a sofrer com a falta dos recursos hídricos e consiga manter uma boa qualidade de vida para os presentes e as futuras gerações. Além disso, o tópico em questão tem a sua imprescindibilidade por conta da atual situação hídrica que se vive, buscando, desta forma, a sua preservação qualitativa e quantitativa por meio da economia circular,

1. ECONOMIA CIRCULAR: CONCEITUAÇÃO

A economia circular é um importante pilar na manutenção de um desenvolvimento ambiental sustentável, uma vez que tem como objetivo garantir o maior tempo possível dos recursos através da sua reutilização, reduzindo ao mínimo a geração de resíduos e preservando os recursos naturais existentes. Sendo assim, faz-se imprescindível a implementação de projetos e, posteriormente, a aplicação de diversas formas para o seu desenvolvimento sustentável, conforme demonstra a Estratégia Espanhola de Economia Circular (2018, p. 07):

> *Es necesario avanzar en la implementación de un modelo de desarrollo y crecimiento que permita optimizar la utilización de los recursos, materias y productos disponibles manteniendo su valor en el conjunto de la economía durante el mayor tiempo posible y en el que se reduzca al mínimo la generación de residuos*.

Dessa forma, "*se trata de implementar una nueva economía, circular –no lineal-, basada en el principio de cerrar el ciclo de vida de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energia*" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 27). Baseando-se, em uma nova forma de reutilização, "*new is, however, the focus on the transition from the old, linear and unsustainable systems towards new, circular, systems*" (Scheepens et al., 2016, p. 257), com o fim de trazer benefícios para a coletividade e ao meio ambiente. Tendo em vista que "*la economía circular propone un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza los stocks y los flujos de materiales, energia y residuos, y cuyo objetivo es la eficiencia del uso de los recursos*" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 28).

Contudo, a tendência ou "*the implementation of the Circular Economy is not isolated from the general practices of environmental management. On the contrary, these practices are the initial path to advance towards Circular Economy*" (Ormazabal et al., 2018, p. 158) e, também, ao desenvolvimento sustentável.

Resta necessário asseverar sobre a Estratégia Espanhola de Economia Circular, a qual relata de forma muito clara em seus gráficos como funciona ou deve funcionar a economia circular, traçando uma estratégia de diferentes planos de atuação, os quais serão realizados em curto, médio e longo prazo.

Ademais, a Estratégia Espanhola de Economia Circular (2018, p. 2018) tem como objetivo a produção, por conseguinte, o consumo, posteriormente, a gestão de resíduos e, na sequência, a transformação destes em matérias primas secundárias e, também, o mais importante para o presente estudo, a reutilização dos recursos hídricos, sendo que todos traçam o objetivo de sensibilização, participação, investigação, inovação e competitividade e, ainda, emprego e formação.

Portanto, como demonstrado, a economia circular tem como objetivo reintroduzir em um modo econômico aqueles produtos e recursos naturais que não correspondem as formas iniciais e, também, as necessidades dos consumidores. É imprescindível a sua reutilização uma vez que por diversas vezes a utilização dos recursos naturais pelo homem supera a capacidade de renovação da natureza, conforme explica a Comunicação da Comissão do Parlamento Europeu (2015), propondo que sejam evitados ou diminuídos os danos causados ao meio ambiente.

> *Al mismo tiempo, ahorrará energía y contribuirá a evitar los daños irreversibles causados en lo relativo al clima y la biodiversidad, y a la contaminación del aire, el suelo y el agua, a causa de la utilización de los recursos a un ritmo que supera la capacidad de la Tierra para renovarlos.*

2. A REUTILIZAÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS NO SETOR URBANÍSTICO COMO BENEFÍCIO DO TURISMO NACIONAL

Resta disposto na Estratégia Espanhola de Economia Circular (2018, p. 26), que "[...] *demanda de recursos naturales, supera la biocapacidad se incorre em déficit ecológico, lo cual significa que un país consume más recursos de los que dispone, incurriendo, en último término, en un desarrollo no sostenible*".

Assim, tendo em vista a escassez hídrica e, possuindo consciência que a água ocupa um papel central na vida, buscam-se formas de garantir a sua quantidade, então "*en el sector del agua, el concepto de economía circular se materializa en volver a utilizar el agua una y otra vez, tal como sucede en el ciclo natural*" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 27), reduzindo o seu consumo e as suas perdas, otimizando seu aproveitamento e reutilizando sempre que possível para fins compatíveis. Pois, conforme aduz Echaide (2018, p. 34), os recursos hídricos são escassos e devem estar sob tutela.

> *Desde casi todos los sectores se coincide sobre el diagnostico de que el agua es un bien escaso al que se debe cuidado. Se trata del bien más indispensable y más compartido por todos los seres vivos del planeta, con la sola excepción del aire.*

Diante disso, tendo em vista que o "[...] seu volume em relação à capacidade de sustentação e assimilação dos meios de suporte e receptores: o meio ambiente tornou-se escasso e precisa ser "economizado" (Bicudo et al., 2010, p. 44), encontrando maneiras para acondiciona-lo de forma saudável.

Levando em consideração que "[...] *el agua regenerada puede sustituir usos que no requieran una calidad elevada, liberando volúmenes de mejor calidad para otros usos más exigentes*" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 39), garantindo uma maior disponibilidade hídrica, reutilizando-as em locais que não necessitam água de grande qualidade.

Por isso é tão essencial "*impulsar las políticas en materia de gestión sostenible del agua, fomentando su aprovechamiento y reutilización con el objetivo de procurar cerrar el círculo y conseguir una gestión eficiente de este recurso tan escasso*" (Espanã Circular 2030, 2018, p. 56), com o fim manter equilíbrio entre a natureza e a coletividade.

Neste ínterim, considerando que sem água de boa qualidade e em quantidade suficiente não existe vida saudável, é extremamente necessário que seja aplicada a economia circular no seu uso e manejo, assim como complementa a estratégia espanhola de economia circular (2018, p. 127).

> *El agua es un bien de primera necesidad, de cuya disponibilidad inmediata y en condiciones de salubridad dependen nuestras sociedades. Sin embargo, su escasez se há agravado durante las últimas décadas, produciendo efectos perjudiciales sobre el médio ambiente y la economía.*

O sistema de reutilização dos recursos hídricos residuais urbanos e industriais, vem como grande aliado para combater o desperdício da água e, complementar um desenvolvimento mais sustentável, vez que, "*the circular economy offers a new way of looking at the relationships between markets, customers and natural resources, promoting sustainable and resource-efficient policies and practices*" (Voulvoulis, 2018, p.7), assim, uma ação onde todos os agentes possam usufruir dos benefícios.

Levando em conta que "esta planificación integrada debe garantizar que la reutilización contribuya a mejorar la sostenibilidad general del agua y a reducir las presiones sobre los ecosistemas en favor de una Economía Circular" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 41). Além disso, vale lembrar que se esta ação não trouxesse benefícios para a sustentabilidade, seria inviável sua aplicação, contudo, mostra-se extremamente eficaz na redução da utilização dos recursos hídricos, conservando-os em melhor qualidade e em maior quantidade.

Outrossim, deve-se utilizar a economia circular como meio de repensar o manejo e o uso dos recursos hídricos, uma vez que, "*a circular business model can have quite an impact on the level of a society*" (Scheepens et al., 2016, p. 260), demonstrando ser uma ação que beneficia todos, pois garante que os recursos hídricos se mantenham em maior tempo em boa qualidade e em maior quantidade.

A reutilização supramencionada fará total diferença em regiões em que a escassez da água aparece como uma realidade, além daqueles que o crescimento demográfico ocorre em grande escala e, ainda, onde as alterações climáticas perspectivam essa escassez, desta forma, a gestão sustentável deste recurso torna-se indispensável para a conservação.

O plano de ação da economia circular através da reutilização dos recursos hídricos residuais tratados é uma das estratégias que este trabalho apresenta, sendo que a reutilização constituirá um imperativo imprescindível para as indústrias, agricultura, rega paisagística, municípios e lazer.

Conforme a estratégia Espanhola de economia circular (2018, p. 127), em busca de medidas destinadas para garantir a eficiência hídrica, a reutilização das águas residuais tratadas em condições seguras é uma das mais valiosas ferramentas para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos naturais e, para que isso seja possível a União Europeia traça planos e legislações sobre os requisitos mínimos

de qualidade da água para sua suscetível reutilização.

Ademais, a reutilização dos recursos hídricos residuais tratados "[…] *constituye una de las principales alternativas de este nuevo paradigma de gestión de recursos hídricos*" (Aznar-Crespo et al., 2019, p. 760), uma vez que permite o aumento da oferta deste recurso e a redução da pressão sobre os recursos hídricos convencionais, mantendo a quantidade hídrica natural em boa qualidade, o que é o ponto principal deste trabalho, 'a manutenção da água natural sempre pura sem a alteração humana'.

Assim, o que se espera da economia circular das águas residuais tratadas é que atue como um "[...] *sistema económico que permita la regeneración del capital natural, en definitiva, del mantenimiento de los ecosistemas ecológicos para la provisión de los servicios ambientales que nos ofrecen*" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 48).

A reutilização dos recursos hídricos resíduas é uma atividade que surge como uma resposta para a escassez da água, como uma 'solução' para o impacto ambiental da gestão tradicional deste recurso, reduzindo a contaminação e a pressão sobre as massas de água natural. Além disso:

> *La depuración y reutilización de aguas es una actividad importante que entra em el marco de la economía circular, pues busca, principalmente, reducir el impacto ambiental derivado de los vertidos de aguas contaminadas e incrementar los recursos disponibles mediante el aumento de calidad de aguas ya utilizadas, de modo que puedan volverse a utilizar* (García López et al., 2019, p. 470).

Segundo Gómez (2019, p. 434), nas últimas décadas foram executados grandes avanços no tratamento das águas residuais e, também, foram criadas e aplicadas novas tecnologias de recirculação, reutilização e controle de redes de transporte e distribuição deste recurso, o que fez com que fosse possível a melhora na eficiência técnica em todo o ciclo dos recursos hídricos, inclusive na substituição dos recursos convencionais escassos por águas residuais tratadas, possibilitando medidas práticas e sustentáveis que contribuíram para a recarga de aquíferos e conservação do solo.

Levando em consideração os benefícios da reutilização da água, tem-se utilizado esse sistema para aumentar a eficiência hídrica em toda União Europeia, visto que "[…] *la reutilización de las aguas residuales tratadas en condiciones seguras y rentables es un medio valioso pero infrautilizado de aumentar el suministro de agua y reducir la presión sobre unos recursos hídricos ya sobreexplotados*" (European Commission, 2017, p. 13).

A reutilização dos recursos hídricos residuais demonstra-se uma opção extremamente estratégica para o aumento da oferta e de água, motivo pelo qual será discorrido brevemente sobre relação dos setores que são utilizados este tipo de recurso. Visto que "*en el sector urbano, mediante la regeneración de las aguas residuales, se puede mitigar el consumo neto de agua reutilizándola en diferentes aplicaciones (riego agrícola, parques y jardines, limpieza…)*" (Melgarejo Moreno, 2019, p. 27).

É imprescindível aduzir que a legislação estabelece quais são os usos dos recursos hídricos residuais tratados permitidos e os proibidos, mantendo padrões de qualidade e segurança para a coletividade, em conformidade com Melgarejo Moreno (2019, p. 42).

> *El RD 1620/2007 estableció los usos permitidos (agrícolas, recreativos, industriales y ambientales) y prohibidos (consumo humano, industria alimentaria, sanitarios, agua de baño, torres de refrigeración y condensadores evaporativos), los procedimientos administrativos y los parámetros de calidad, así como valores*

> *máximos permitidos para cada uso.*

Outrossim, necessário aduzir que são diversos os usos em que os recursos hídricos residuais podem ser utilizados *"*[...] *descarga de inodoros, riego de jardines como en parques, campos de golf, áreas verdes, residenciales, cementerios, medianas de autopistas, patios escolares, protección contra incendios y aire acondicionado*" (García Calvo, 2019, p. 849).

No setor urbano, as reutilizações dos recursos hídricos residuais tratados podem ser mais amplas e diversificadas, o que apresenta ser uma grande alternativa para o equilíbrio ambiental e a economia regional, pois esse recurso será de menor custo e, ainda, estará atuando no combate ao desperdício.

Sob o mesmo ponto de vista refere Dautant (2016, p. 28), no meio urbano podem ser reutilizados os recursos hídricos em construções civis, irrigações de jardins, lavagens de ruas e calçadas, em parques recreativos, turismo, energia, parques, cemitérios, campos de golfe, faixas de domínio de auto-estradas, campus universitários, cinturões verdes, gramados residenciais, irrigação paisagística, combate ao fogo, descarga de vasos sanitários, sistemas de ar condicionado, lavagem de veículos, pontos de ônibus, entre outros

> *Las aplicaciones más comunes son: el lavado de camiones, maquinaria pesada, trenes, aviones; la irrigación de cultivos, campos de golf, paisajismo, zonas verdes residenciales y de cementerios; mantener lagos artificiales, lagunas ornamentales; la recarga de acuíferos; el control del polvo en vías de comunicación rurales; la mejora de ecosistemas; descargas de inodoros y urinarios; aguas de enfriamiento y aguas para calderas en plantas industriales; mantener los niveles de agua en los sistemas contra incendio; consumo de agua potable de manera directa o indirecta entre otros.*

Levando em consideração que o turismo representa grande parte da economia global, sendo uma grande fonte de renda e giro de economia, a reutilização dos recursos hídricos residuais tratados pode trazer diversos benefícios para a economia nacional quando utilizadas no setor urbanístico.

Como já mencionado, os recursos hídricos residuais tratados podem ser reutilizados em fontes de água que sejam consideradas pontos turísticos, paisagens, fontes, cascatas, lagos paisagísticos com proibição de contato, campos de golf e tudo que seja necessário para boa manutenção de áreas verdes de cidades e bem estar da coletividade.

Outro ponto relevante desta pratica é que a utilização dos recursos hídricos residuais faz com que não seja necessário utilizar fontes águas de boa qualidade, consideradas águas de usos nobres, para o setor urbanístico "os grandes desafios da sustentabilidade perpassam pelas transformações ocorridas no meio ambiente, que em grande parte decorrem das intervenções feitas pelo homem no meio ambiente" (Pilau Sobrinho, 2017, p. 26).

Em virtude disso, deve ser entendido que o setor urbanístico sustentável, realizado a partir de reutilização de águas tratadas, como uma atividade econômica, pode gerar mais empregos e produzir riquezas para os locais em que estiver, uma vez que "o tripé das dimensões da sustentabilidade permeiam uma íntima relação de dependência, pois as ações do mercado repercutem sensivelmente no cotidiano da sociedade, que por sua vez trará consequências ao meio ambiente" (Pilau Sobrinho, 2017, p. 30).

Conforme aduz Alves e Pilau Sobrinho (2018, p. 64) a noção de sustentabilidade pressupõe a continuidade de certas operações sociais, principalmente econômicas, razão pela qual mostra-se

extremamente benéfica e sustentável a aplicação de tal prática, isso porque alavanca a preservação e garantia quanto à proteção dos recursos naturais.
Pode-se utilizar como exemplo Frísia, que busca atrair turistas pelas áreas naturais protegidas, pouca poluição regional e recreação aquática, que se demonstra completamente possível e aplicável em outros locais em decorrência dos benefícios ambientais, econômicos e sociais.

> *The combined business model of water recreation in Friesland fulfils the double objective of eco-efficient value creation: It combines more tourists in the region, attracted by the protected natural areas, with less regional pollution caused by these tourists* (Scheepens et al., 2016, p. 265).

Além disso, para que seja possível a manutenção sustentável do turismo, é necessário a aplicação de medidas para evitar danos ao meio ambiente, conforme realizado na Frísia e asseverado por Scheepens et al. (2016, p. 266-267).:

> *To avoid further environmental deterioration, the water recreation service must be converted to a sustainable business model through the introduction of sustainable yachts, using renewable energy for propulsion and applying sustainable materials.*

Esta prática pode ser aplicada pois "*in other countries we see similar successful policies with regard to sustainable tourism*" (Scheepens et al., 2016, p. 267), mas para concretização do turismo sustentável é necessário investimento em utilização de águas residuais neste setor, estudos para aplicação, o fomento destas práticas e a capacitação dos gestores para se adequar as demandas necessárias para a manutenção de um meio ambiente ecologicamente equilibrado, buscando o bem estar de todos.

Deve-se pensar muito além do que será investido para a prática do turismo sustentável, pois "*the advantage of the method of Eco-efficient Value Creation is that the designer of a system is guided in a wider perspective than costs and subsidies alone*" (Scheepens et al., 2016, p. 265) mostrando-se ecologicamente correto e sustentável.

É imprescindível ter consciência que o ser humano é extremamente dependente de todo ecossistema para a sua sobrevivência, "é necessária uma reflexão sobre o mundo atual, na qual se tenha em mente que o meio ambiente não é parte do mercado globalizado e, sim, o elemento substancial da sobrevivência do planeta" (Pereira et al., 2018, p. 178) e a utilização dos recursos hídricos residuais demonstra-se vantajosa, pois conforme assevera Pereira et al. (2018, p. 183):

> [...] o crescimento socioambiental sob uma perspectiva de racionalidade ambiental, de modo que se quer que o homem perceba a necessidade de interação com a natureza, vez que a dependência é recíproca; que a natureza não é apenas um meio de comércio, mas, também, elemento importante para a sobrevivência humana.

Por isso, "o desafio se faz diante do liame entre a racionalidade e a sabedoria, em que está prescrito deve ser repensado e o novo deve ser forjado sobre as areias da incerteza e da inconstância" (Pereira et al., 2018, p. 181) acreditando que será possível um meio ambiente ecologicamente equilibrado com a reutilização dos recursos hídricos residuais em todos os setores.

Com a inclusão da economia circular, no tocante a reutilização dos recursos hídricos residuais tratados, pode-se alcançar diversos progressos, diminuindo a escassez da água e auxiliando regiões onde este recurso é insuficiente. Por se tratar de um recurso natural mais raro e caro, reutilizar é fundamental para o meio ambiente, para a sociedade e economia, conforme Gómez (2019, 434) destaca:

> *Sin duda, las oportunidades del progreso técnico, impulsadas en buena medida por la escasez económica del agua, representan una oportunidad para revertir los procesos de aumento de la escasez y facilitar la adaptación a los problemas sobrevenidos del cambio climático. Pero, para ello, también es necesario que los incentivos económicos estén a la altura*.

Melgarejo Moreno (2019, p. 37) refere que podem ser consideradas diferentes estratégias para a aplicação da economia circular, sendo de maior a menor eficiência, na economia social. Medidas podem ser aplicadas nos dias em que vivemos, visto que são de baixo custo para a coletividade e tende a trazer benefícios econômicos. Em síntese, para que isso seja possível, é necessário o engajamento de todos os setores.

> *En este nuevo modelo, la potencialidad de la reutilización de aguas es un hecho incontrovertible, sobre todo en países con problemas de escasez como es el caso de España, pero su consolidación como recurso no convencional estratégico es un reto que obliga a todos los actores con responsabilidad en el tema a actuar de forma coordinada y con absoluto rigor en la planificación de las actuaciones futuras* (Melgarejo Moreno, 2019, p. 45).

Logo, para que seja possível a reutilização dos recursos hídricos residuais tratados como um plano de ação na economia circular e com o fim de beneficiar o setor turístico nacional no que tange a economia, deve-se ter o engajamento de todos os setores, onde o proposito seja um agente transformador, aperfeiçoando e inovando as formas de utilização da água de forma mais sustentável, responsável e inclusiva.

Além do mais deve ser disponibilizado o acesso a ferramentas de financiamento e gerenciamento de riscos, além da regulação e desenvolvimento de uma boa infraestrutura e, o mais importante de tudo, a educação, tanto para aumentar a conscientização geral para a reutilização das águas residuais, como para criar uma base de habilidades para impulsionar as inovações da economia circular.

Deve ser desenvolvido um planejamento estratégico, onde a gestão, a regulação e a fiscalização atuem juntas, a má aplicação da economia circular pode enfraquecer o sistema, fazendo com que este não atue de forma pontual para atender os interesses da coletividade e logo seja deixado de lado pela dificuldade da sua implementação. Desta forma, planos estratégicos, tecnologias, inovações e estudos científicos são essenciais e devem ser incentivados para a boa aplicação do sistema.

Desta forma, este estudo analisou a possibilidade de reutilização da água para fins urbanísticos, utilizando como modelo a Província Europeia de Frísia. Cabe salientar que no Brasil há grande possibilidade de ser implantado um modelo de reutilização de águas residuais no setor urbanístico, mas para isso são necessários avanços tecnológicos, acesso à informação e os incentivos que podem ser dados aos cidadãos que fizerem o uso da prática de reutilização dos recursos hídricos residuais tratados com o objetivo de beneficiar o turismo, podem ser uma excelente solução para a minimização da escassez dos recursos hídricos e um grande aliado na economia do país, visto que a partir da utilização de recursos residuais tratados, surgem também preços mais competitivos no que tange a economia turística, tendo em vista a aplicação de custos e tarifas mais baixas, gerando empregos e outros benefícios.

REFERENCIAS

- Alves, Paulo Roberto & Pilau Sobrinho, Liton Lanes (2018). A proteção do consumidor pela demarcação do risco biotecnológico ante a distinção lícito/ilícito. En: Liton Lanes Pilau

Sobrinho, Fabíola Wüst Zibetti, Rogerio da Silva (organizadores), *Balcão do Consumidor: coletânea cidadania, mediação e conciliação*. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.
- Aznar-Crespo, Pablo, Aledo, Antonio & Melgarejo, Joaquín (2019). Percepción social e implementación de la reutilización de aguas regeneradas por parte de comunidades de regantes. En: Joaquín Melgarejo Moreno, *Congreso nacional del agua Orihuela: Innovación y sostenibilidad*. Universitat d'Alacant, Alicante.
- Bicudo, C. E.de M., Tundisi, J.G. & Scheuenstuhl, M. C. B. (2010). *Águas do Brasil: análises estratégicas*. Instituto de Botânica, São Paulo.
- Dautant, Rafael (2016). El uso seguro del agua residual tratada: aspecto fundamental en la nueva cultura del agua. En: Pilar Tello Espinoza, Petia Mijailova & Rolando Chamy, *Uso seguro del agua para el reuso.*
- Echaide, Javier (2018). *El derecho humano al agua potable y los tratados de protección recíproca de inversiones*. La Ley, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- European Commission (2017). *On the implementation of the Circular Economy Action Plan*. Brussels, European Commission.
- España Circular 2030 (2018). *Estrategia española de economía circular*. Ministerio de de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- García Calvo, Eloy (2019). Agua y economía circular: energía, reutilización y ¿descentralización? En: Joaquín Melgarejo Moreno, *Congreso nacional del agua Orihuela: Innovación y sostenibilidad*. Universitat d'Alacant, Alicante.
- García López, Marcos, Montaño Sanz, Borja & Melgarejo Moreno, Joaquín (2019). La recuperación de costes de la depuración y reutilización de aguas en España. En: Joaquín Melgarejo Moreno, *Congreso nacional del agua Orihuela: Innovación y sostenibilidad*. Universitat d'Alacant, Alicante.
- Gómez, Carlos Mario (2019). Los incentivos económicos y la seguridad hídrica em España. En: Joaquín Melgarejo Moreno, *Congreso nacional del agua Orihuela: Innovación y sostenibilidad*. Universitat d'Alacant, Alicante.
- Melgarejo Moreno, Joaquín (2019). Agua y economía circular. En: Joaquín Melgarejo Moreno, *Congreso nacional del agua Orihuela: Innovación y sostenibilidad*. Universitat d'Alacant, Alicante.
- Ormazabal, M., Prieto-Sandoval, V., Puga-Leal, R. & Jaca, C. (2018). Circular Economy in Spanish SMEs: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production,* 185 (1), 157-167. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.031
- Parlamento Europeo. (2015). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las regiones: Cerrar el Círculo: Un plan de acción de la UE para la economía circular*. Comisión Europea, Bruselas.
- Pereira, Agostinho Oli Koppe, Rocha, Leonel Severo & Calgaro, Cleide. (2018). A modernidade tecnológica, o consumocentrismo e a insustentabilidade ambiental: a educação para o consumo como forma minimizadora dos problemas socioambientais. En: Liton Lanes Pilau Sobrinho, Fabíola Wüst Zibetti, Rogerio da Silva (organizadores), *Balcão do Consumidor: coletânea cidadania, mediação e conciliação*. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.
- Pilau Sobrinho, Liton Lanes. (2017). *Desafios da sustentabilidade na era tecnológica: (im) probabilidade comunicacional e seus impactos na saúde e meio ambiente*. UNIVALI, Itajaí.
- Scheepens, A.E., Vogtlüander J. G. & Brezet, J.C. (2016). Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 114 (15), 257-268. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075
- Voulvoulis, Nikolaos. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health,* 2, 32-45. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005

LECCIONES DEL ETNOCONOCIMIENTO INDÍGENA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES SÚBITAS. EL CASO DE LA COMUNIDAD INDÍGENA NASA (CAUCA-COLOMBIA)

Isaleimi Quiguapumbo Valencia
Estudiante de Máster, Universidad de Alicante, España
isaleimi@unicauca.edu.co

Antonio Aledo Tur
Departamento de Sociología 1, Universidad de Alicante, España
antonio.aledo@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-9261-1292

Sandra Ricart Casadevall
Instituto Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante, España
sandra.ricart@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-5065-0074

RESUMEN

El objetivo de esta comunicación es sistematizar los elementos del etnoconocimiento de la comunidad indígena Nasa (municipio de Corinto, Colombia) relacionados con el ciclo de vida de las inundaciones súbitas. Además, se describe cómo el empleo del enfoque *emic/etic* permite comprender mejor la perspectiva local de la gestión del riesgo por inundaciones súbitas e integrarla en la gestión moderna. El material que alimenta este trabajo se compone de un conjunto de entrevistas semi-estructuradas realizadas a los principales actores territoriales (*The Wala's*) de la comunidad indígena Nasa, documentos del *Plan de Vida* de este grupo y la consulta a informes técnicos. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto cómo la comunidad indígena Nasa dispone de un modelo ancestral para la gestión del riesgo ante inundaciones súbitas que resulta útil para minimizar la vulnerabilidad de la población. Este modelo se basa en la realización de distintas actividades, rituales y normas ancestrales, todas ellas sostenidas en la sacralización de la naturaleza, que contribuyen a la seguridad de la población frente al riesgo de inundación, favorecen la transmisión de conocimientos entre generaciones y fortalecen el orden social de la comunidad, que a su vez aumenta el nivel de resiliencia grupal. Sin embargo, la marginación, la exclusión social y la pérdida de la cultura ancestral que padece este grupo étnico ponen en riesgo el mantenimiento de estas prácticas tradicionales.

1. INTRODUCCIÓN

El etnoconocimiento tiene distintas definiciones, pero todas ellas hacen referencia a un sistema compuesto por prácticas, habilidades, valores, actitudes o creencias que desarrolla una comunidad a lo largo de la historia (Dekens, 2007a; Boillat y Berkes, 2013), por lo que la comunidad desarrolla una manera particular y diferenciada de interpretar la realidad y adaptarse a los cambios. Esta interpretación de la realidad es adquirida a través de la observación e interacción con el entorno, y transmitida a otras generaciones, lo cual ha permitido que las comunidades indígenas tengan una comprensión más profunda del comportamiento en el entorno en el que habitan (Molina y Neef,

2016). De esta manera, las comunidades indígenas mantienen un vínculo profundo con la naturaleza que se fortalece mediante rituales y actividades comunitarias. Estas acciones son clave para que las comunidades indígenas realicen acciones de conservación y preservación del medio natural y para que vivan en armonía y equilibrio en su entorno durante largos periodos de tiempo. Esta comprensión íntima y holística de su entorno ha permitido que las comunidades indígenas por medio del etnoconocimiento realicen un uso sostenible de los recursos naturales, que contribuye a su adaptación y resiliencia frente a los riesgos naturales (Hiwasaki, Luna y Shaw, 2014; Magni, 2017).

La vinculación del etnoconocimiento en el campo de la gestión del riesgo natural y los desastres ha debido afrontar importantes retos (Iloka, 2016). Inicialmente, el conocimiento científico estuvo arraigado al colonialismo (Dekens, 2007b), el cual ignorará y se mostrará ajeno a la existencia de las comunidades indígenas y sus creencias, prácticas ancestrales y rituales. Otro obstáculo será el empleo de soluciones no estructurales ante los riesgos naturales por parte de las poblaciones indígenas frente al predominio de las estructurales en la moderna gestión del riesgo de desastres. El etnoconocimiento logra una capacidad de adaptación y recuperación en todas las fases del ciclo de vida del desastre (pre, durante y post-desastre) aplicando mecanismos de bajo coste. Por todo ello y hasta la fecha, el etnoconocimiento muestra una integración lenta en los procesos de gestión del riesgo natural (Hiwasaki, Luna y Shaw, 2014; Lin y Chang, 2020).

En el territorio ancestral del municipio de Corinto (departamento del Cauca, Colombia), el etnoconocimiento de las comunidades indígenas es ampliamente ignorado y escasamente valorado. El limitado número de estudios en esta materia se explica por el hecho que, aunque las comunidades indígenas tienen una apropiación territorial y comunitaria del riesgo natural, los conflictos entre las comunidades indígenas, la sociedad y el Estado impiden su incorporación a la actual gobernanza del riesgo en Colombia. Estos conflictos surgen por los sucesos desencadenados durante la colonización, relaciones de desigualdad y opresión del Estado, lo cual ha influido en que las comunidades indígenas, en su gran mayoría, estén en riesgo de perder el etnoconocimiento adquirido durante décadas. La comunidad indígena Nasa no es ajena a dicha relación desigual.

La necesidad de profundizar acerca del etnoconocimiento de la comunidad indígena Nasa y su relación con la gestión del riesgo por inundaciones súbitas conducen a la pregunta de investigación: ¿Qué factores explican la gestión del riesgo por inundaciones súbitas que afecta a la comunidad indígena Nasa y cómo ello condiciona su vulnerabilidad? La falta de implementación y transmisión del etnoconocimiento que, a su vez, se encuentra disperso y en riesgo de desaparecer, requiere recopilar el etnoconocimiento de la comunidad indígena Nasa en relación con el ciclo de vida de la gestión del riesgo ante las inundaciones súbitas (pre-, durante y post-), objetivo de esta comunicación. Para alcanzar dicho objetivo, se han realizado entrevistas semi-estructuradas a los seis *The Wala* de la comunidad con la intensión de acceder al conocimiento, su estructuración y caracterización en el ciclo de vida de la gestión del riesgo natural, además de comprender la estructura de su pensamiento, su forma de organizar la respuesta ante el riesgo y cómo generan seguridad física y ontológica para aumentar su resiliencia y capacidad de confrontación ante los desastres naturales. La investigación aporta información de relevancia para reducir y gestionar las inundaciones súbitas a partir de la convivencia y comprensión de la naturaleza. Todo ello, ofrece una alternativa para reducir la exposición y el riesgo natural a las inundaciones súbitas.

2. CASO DE ESTUDIO

2.1. Historia colonial de la comunidad indígena Nasa

Antes de la conquista española la comunidad indígena Nasa vivía dispersa en las montañas, alejados de la ronda hídrica dada su connotación sagrada (Wilches, 2005). Este grupo étnico se ubicaba en Tierra Adentro, en el Departamento del Cauca, (Colombia). Con la llegada de los españoles y la

conquista de nuevas tierras, el sistema de organización y las costumbres cambiaron drásticamente (Rappaport, 2004). En el siglo XVI, a la comunidad Nasa, como a otras comunidades indígenas de Colombia, se les despojó de sus tierras ancestrales de manera violenta (Hernández, 2004). En el tránsito que supuso la búsqueda de la libertad en el siglo XIX, la comunidad Nasa realizó alianzas con los criollos, contribuyendo a la guerra de la independencia de Colombia, sin embargo, persistió la opresión colonial, llamada la segunda conquista (Rappaport, 2004). Desde el siglo XX hasta la actualidad, los gobiernos continuaron creando obstáculos para la titulación, ampliación y protección de los resguardos indígenas (Romero Medina, 2007). Es más, solo se permitió la autonomía y jurisdicción en las áreas de resguardo[1], y no así en los territorios ancestrales[2] donde la comunidad indígena Nasa desarrolla sus prácticas tradicionales desde antes de la conquista. La falta de reconocimiento de los gobiernos también supondrá la limitación del desarrollo cultural de la comunidad (Espinosa, 2007), poniendo en riesgo la cultura y la supervivencia de los derechos colectivos del grupo étnico (Semper, 2006).

2.2 El contexto

Esta comunidad se localizada en el territorio ancestral del municipio de Corinto, al norte del Departamento del Cauca, en la parte sur occidental de la República de Colombia, sobre las estribaciones de la Cordillera Central (Figura 1). El territorio ancestral cuenta con unas características geográficas que favorecen la ocurrencia de las inundaciones súbitas (Plan municipal de gestión de riesgos de desastres, 2012). En el área de la planicie aluvial, el territorio presenta una precipitación media anual de 1.050 mm y en la zona montañosa las precipitaciones aumentan hasta 2.000 mm, estas variaciones se dan por la presencia de la Cordillera Central (Esquema de ordenamiento territorial, municipio de Corinto, 2001). El territorio posee pendientes que van entre 13% a 75 %, asimismo, tiene una arteria fluvial, el río La Paila. Este río nace a los 3.000 m y recorre gran parte del municipio.

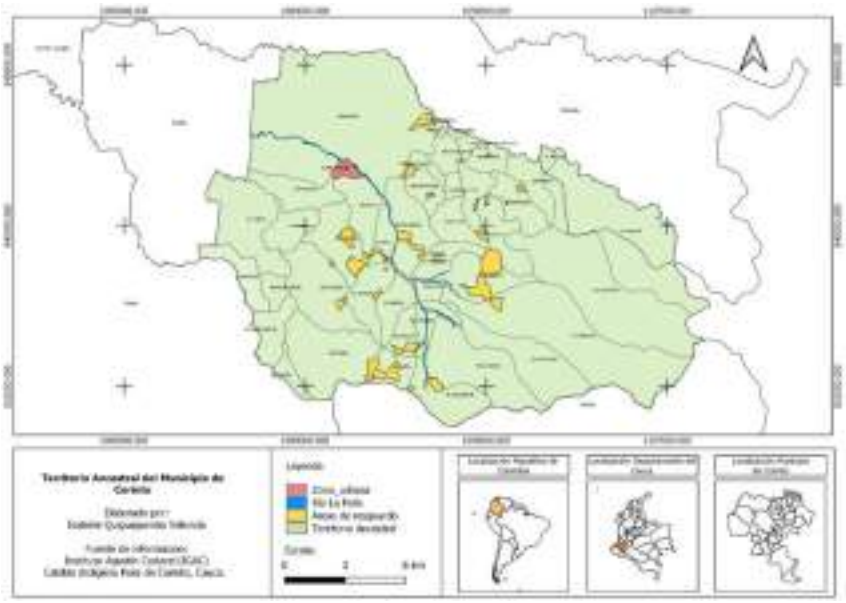


Figura 1. Localización del territorio ancestral, con delimitación del territorio ancestral y los resguardos indígenas. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Plan de Vida (2015).

[1] Son tierras de propiedad colectiva bajo la forma jurídica de resguardo conforme en los artículos 63 y 329 de la Constitución Política de Colombia de 1991. Estas tierras tienen el carácter de inalienables, imprescriptibles e inembargables.

[2] Hace referencia a un territorio que no está legitimado ni delimitado como área de resguardo, pero que se considera parte de la identidad cultural ya que antes del colonialismo este territorio estaba habitado y pertenecía a la comunidad indígena Nasa.

La comunidad indígena Nasa que habita este territorio ancestral tiene un etnoconocimiento particular sobre la dinámica y el respeto hacia las fuentes hídricas de mayor relevancia del territorio, donde destaca el río La Paila. El respeto hacia el río La Paila es transmitido por los *The Wala*[3] generación tras generación, resaltando la importancia de las fuentes hídricas, que son sagradas. Los *The Wala*, con sus conocimientos y experiencia, fortalecen el nexo entre la sociedad y la naturaleza. Desde su etnoconocimiento se concibe que todos los elementos de la naturaleza (agua, aire, ríos, páramos, quebradas, etc.) siguen un orden y unas funciones, reconociendo que son entes vivos. Perciben que es deber de la sociedad comprender y adaptarse a dicho orden para evitar los desastres naturales. Por lo tanto, el *The Wala* evita que el grupo indígena transforme la dinámica de los espacios sensibles del río. Para evitar transformaciones se rigen por una Ley de relevancia dentro de la comunidad, la Ley de Origen o Ley Natural, que justifica la supervivencia de la comunidad a lo largo del tiempo. Se trata de la norma que establece cómo debe comportarse la comunidad Nasa con la naturaleza. La Ley tiene principios básicos que radican en la vida como eje primordial. En este aspecto, dicha Ley señala que la naturaleza ya está organizada y tiene unos espacios de vida esenciales tanto para su desarrollo como para la supervivencia de la comunidad. La Ley establece que alterar los órdenes naturales conlleva que la comunidad pueda padecer de importantes desordenes de ámbito territorial: *wẽe* (hambre), *nxusna* (sufrimiento), *nxu'ween* (sed) y *ãça'n* (enfermedades) (Plan de vida, 2015).

3. METODOLOGÍA

La presente investigación tiene un enfoque cualitativo de carácter analítico y etnográfico. Este enfoque es de relevancia en este tipo de investigaciones en las que se pretende profundizar, de una manera holística, en los elementos del etnoconocimiento de que dispone la comunidad Nasa en el ciclo de vida de la gestión del riesgo por inundaciones súbitas. Las técnicas más utilizadas para acceder a la información de una comunidad a partir de este método etnográfico son dos: la observación participante y la entrevista en profundidad, y en esta investigación se implementó la segunda (entrevista semi-estructurada). Con el fin de asegurar la recopilación del etnoconocimiento de la comunidad Nasa en el ciclo de vida del desastre se crearon cinco categorías operacionales: focos de afectación, etapas del desastre, actividades, responsables, significado y cita de la entrevista. Estas actividades se describen a continuación:

- Focos de afectación: si bien el riesgo por inundaciones súbitas tiene afectaciones múltiples, para la presente investigación se han tenido en cuenta tres elementos principales: residencias, activos económicos e infraestructuras.
- Etapas del desastre: se fundamentan en el ciclo de vida del riesgo de desastre (pre-, durante y post-desastre). Para el análisis de los ciclos se sigue el enfoque y la metodología que aplica la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en el Análisis de sistemas de gestión de riesgos de desastre (Baas, Ramasamy, de Pryck, y Battista, 2009), así como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en el Manual de gestión del riesgo de desastre para comunicadores sociales (Ulloa, 2011). Además, se pretende transmitir que el ciclo de vida del desastre está relacionado con acciones socio-históricas, es decir, el desastre no solo implica daños y pérdidas, sino que también responde a una serie de acciones realizadas durante su ciclo de vida.
- Las actividades: son las acciones que la comunidad indígena Nasa realizaba en épocas ancestrales para gestionar el riesgo por las inundaciones súbitas.
- Los responsables: pretende identificar a las personas a cargo para ejecutar, dirigir y guiar las prácticas ancestrales.

[3] *The Wala's*: son las máximas autoridades dentro del grupo indígena Nasa debido a su experiencia y conocimiento espiritual con el cual fortalecen las prácticas ancestrales y buscan el equilibrio en la relación sociedad-naturaleza.

- Significado: corresponde al valor simbólico que da la comunidad indígena Nasa a cada actividad. La interpretación del valor simbólico se realiza desde la visión *emic* y *etic*, para con ello comprender qué motivaba la realización de las actividades y sus implicaciones en la gestión del riesgo.

Asimismo, cada actividad identificada es acompañada de una cita de la entrevista; esto es, un código vivo que se emplea para obtener información concreta del fenómeno social analizado. En la cita de la entrevista se exponen las principales opiniones del entrevistado acerca de las actividades que se realizaban anteriormente para gestionar el riesgo de desastres por inundaciones súbitas.

En la selección de los entrevistados se tuvo en cuenta el rol, experiencia y el grado de conocimiento dentro la comunidad indígena Nasa. Por lo tanto, se realizaron las entrevistas semi-estructuradas a los seis *The Wala* del resguardo indígena Páez de Corinto, Cauca.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados de la investigación[4]. Estos ponen en manifiesto que la comunidad indígena Nasa tiene un sistema ancestral para gestionar las inundaciones súbitas. Los resultados se presentan en dos grupos: las actividades ancestrales en las fases del desastre (pre-, durante y post-) y actividades y funciones (ambientales, sociales, económicas y culturales) del etnoconocimiento en la gestión del riesgo natural.

4.1. Actividades ancestrales identificadas en las fases del desastre

La comunidad Nasa realiza actividades en el ciclo de vida del desastre (pre-, durante y post-) (Figura 2). En la fase del pre-desastre realizan seis actividades, todas ellas orientadas a limitar la ocupación y uso del suelo en áreas inundables. También realizan rituales que proporcionan seguridad que conectaban a la comunidad Nasa con la dinámica de la naturaleza. Los rituales tienen la función de reducir la exposición al peligro natural y evitar la degradación ambiental. En la fase del durante (eclosión) realizan tres actividades con el fin de mejorar su preparación y capacidad de respuesta ante el riesgo natural ya consumido.

En la fase del post-desastre, por último, realizan dos actividades con el objetivo de recuperarse lo más rápido posible del impacto generado por el desastre, siendo la realización de rituales para recuperar el orden cósmico en el territorio perdido por acciones inadecuadas (deforestación, ampliación de la frontera agrícola, contaminación, etc.) otra de sus prácticas más reconocidas.

[4] Esta comunicación es una síntesis del Trabajo de Fin de Máster (TFM) defendido por la primera autora de esta comunicación y titulado: El etnoconocimiento en la gestión del riesgo por inundaciones súbitas: Sistematización aplicada a la comunidad indígena Nasa (Páez de Corinto, Cauca, Colombia), defendido el 18 de junio de 2020 en el marco del Máster en Planificación y Gestión de riesgos naturales de la Universidad de Alicante. En el TFM hay un mayor detalle de los resultados.

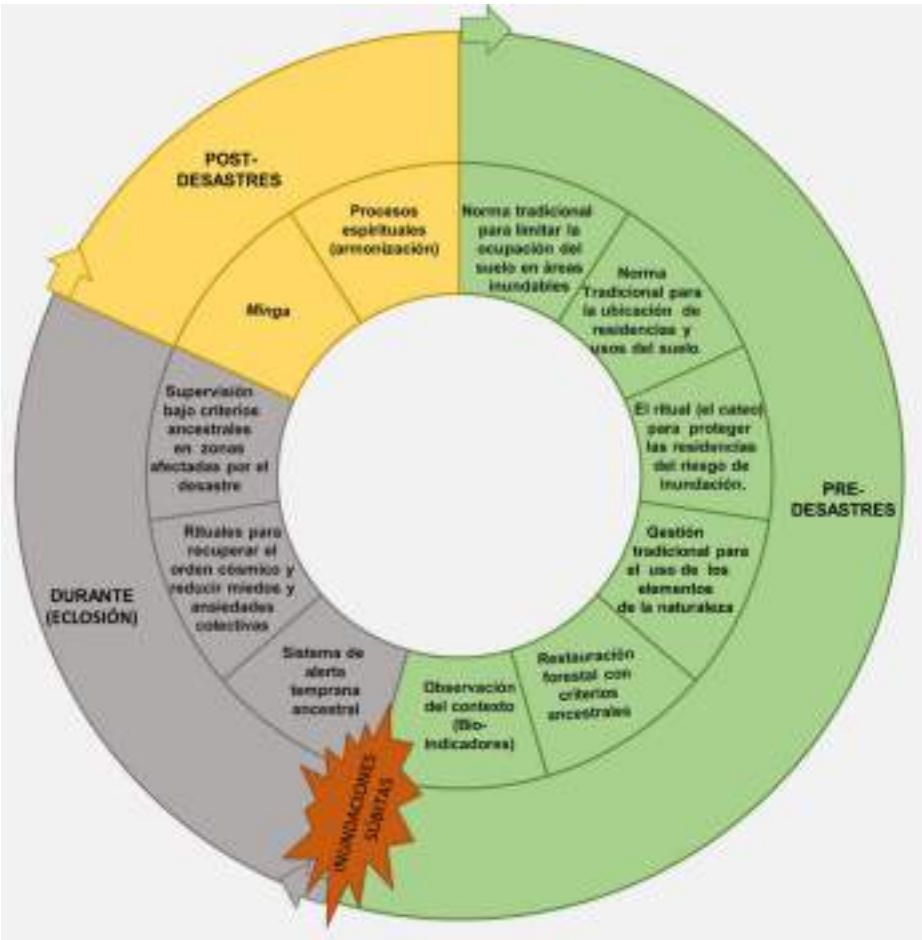


Figura 2. Modelo ancestral de la gestión del riesgo natural en el ciclo de vida del desastre. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2 se resume los principales elementos del etnoconocimiento que tiene la comunidad indígena Nasa en la gestión del riesgo natural. Es un conocimiento holístico e integral. Este grupo étnico realiza acciones en todo el ciclo de vida del desastre a partir del reconocimiento del valor sagrado de la naturaleza y en la implementación de la Ley de Origen. Las prácticas ancestrales las realizaban a partir de la necesidad de cuidar la naturaleza para sus futuras generaciones y ello es lo que les permite reducir el riesgo natural.

4.2. Actividades y funciones (ambientales, sociales, económicas y culturales) del etnoconocimiento en la gestión del riesgo

La comunidad indígena Nasa no realizaba acciones aisladas para reducir el riesgo natural por inundaciones súbitas, si no que reforzaba el etnoconocimiento como un sistema de protección y seguridad para el entono ambiental, económico, social y cultural de la comunidad (Tabla 1), produciendo por tanto un sistema holístico. Se trata de un enfoque cultural coherente con el entorno, capaz de reducir el riesgo natural con medidas ambientales, rituales que conectan a la comunidad indígena Nasa con la naturaleza y con la comprensión de convivir con el entorno natural. El conjunto de acciones permitía regular la conducta de la comunidad en el territorio potencialmente en riesgo por inundaciones súbitas. Además, con las prácticas generaban seguridad ontológica y se reducía la exposición y la vulnerabilidad al riesgo y su impacto sobre residencias, infraestructuras y actividades económicas.

Entorno / Actividad	Entorno ambiental	Entorno económico	Entorno social	Entorno cultural
Pre-desastre Ritual el *cateo*	Reduce la degradación ambiental. Aumenta la capacidad de conviencia con la naturaleza.	Reduce la exposicion. Aumenta la capacidad de adaptación.	Fortalece el orden social exixtente. Transtime conocimientos entre las generaciones. Fortelece los lazos comunitarios.	Fortalece la identidad cultural. Transmite el conocimiento de la cultura de la gestión del riesgo natural. Transmite seguridad ontologica.
Durante Sistema ancestral de alerta temprana		Reduce las posibles perdidas de vidas.	Fortalece la cohesión social. Aumenta la capacidad de apatación.	Transmite el conocimiento de la cultura de la gestión del riesgo natural.
Post- Desastre (La *minga*)		Genera resiliencia económica. Aumenta la capacidad de adaptación.	Transmite la solidaridad. Fortelece los lazos comunitarios.	Resilencia cultural. Transmite el conocimiento de la cultura de la gestión del riesgo natural.

Tabla 1. Funciones del etnoconocimiento en la gestión del riesgo por inundaciones súbitas en relación con las principales actividades identificadas. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen brevemente las funciones de las prácticas mencionadas en la Tabla 1:

- El *cateo* es un ritual de relevancia para la comunidad indígena Nasa. Es un escenario donde se interactúa con los seres espirituales para mantener el orden cósmico de acuerdo con la Ley de Origen. El ritual consiste en realizar un estudio en profundidad del espacio geográfico en el que se identifica, el lugar seguro para ubicar la residencia[5]. En el *cateo* se tiene en cuenta que todos los elementos de la naturaleza tienen vida y a partir de ello se evalúa el territorio. Se trata de un ritual que realiza la familia junto con el The *Wala* para identificar un lugar lejos de los espacios sagrados (ríos, quebradas, páramos, etc.). En este ritual hay una unión entre la praxis ante el riesgo natural, ritual y cosmología. El *cateo* tiene funciones en la gestión del riesgo natural. La ejecución del ritual ha permitido comprender que, la ubicación de las viviendas cerca de espacios sagrados puede generar desequilibrios ambientales. Cuando practican el ritual transmite conocimientos en la necesidad de convivir con la naturaleza para evitar los desastres naturales. Esta cosmovisión es lo que permite reducir la exposición (ubican las viviendas alejadas del río La Paila). En la práctica del ritual se fortalece el orden social existente (el respeto de la Ley de Origen, al *The Wala*, al río La Paila, etc.) y hay una cohesión social. Además, el *cateo* genera seguridad ontológica y transmite la cultura de la gestión del riesgo Natural.

- En la fase de eclosión de la amenaza, la comunidad aplica un *sistema ancestral de alerta temprana* como un mecanismo de preparación y respuesta ante el evento. El sistema consiste en difundir información de las anomalías del río mediante el sonido de los instrumentos musicales (tambores y cuernos de toros). Los sonidos alertaban a la población para que realizaran medidas pertinentes de preparación ante tal evento extremo. Este sistema, según los entrevistados, tenía el propósito de informar a la población que estuviese trabajando cerca del río La Paila, así como en verificar sí las inundaciones súbitas habían afectado a los cultivos.

[5] También se realiza el *cateo* para identificar el área apropiada para cultivar y crear las obras de infraestructura.

Es de resaltar que la identificación de los daños presentados en los cultivos está relacionada con las acciones que se ejecutaban en la fase del pre-desastre, pues no permitían localizar las viviendas en las rondas hídricas[6]. El *sistema ancestral de alerta temprana* tiene funciones para la gestión del riesgo natural. Cuando dan aviso y difunden información a las personas que trabajan cerca del río, dan tiempo a que anticipen su huida y reducen la posibilidad en que se produzcan pérdidas de vidas. Trasmitir la información fortalece la cohesión social del grupo y aumenta la capacidad de adaptación. El sistema genera y fortalece la cultura de la gestión del riesgo natural y los lazos comunitarios.

- Por último, la *minga* es una práctica donde asiste el grupo étnico para realizar un trabajo comunitario. Este grupo se reúne por principios de solidaridad. Los integrantes de la comunidad asisten con el sentimiento de colaborar y ayudar a los demás sin esperar nada a cambio, siguiendo una relación de reciprocidad (Polanyi, 1944). Es una alternativa eficiente para dar respuesta efectiva a alguna situación negativa. Para que este proceso se active, sólo es necesario alertar de la afección de un desastre sobre una persona o unidad familiar y se inicia la congregación de la comunidad de forma voluntaria, es decir, en este fenómeno social hay una reciprocidad comunitaria. Después del desastre, la *minga* tiene la función de contribuir en una recuperación inmediata. Es una práctica que transmite solidaridad desinteresada en términos económicos (resiliencia económica). Es de resaltar que los esfuerzos y los costes de la mano de obra en este escenario son asumidos por toda la comunidad, pues el esfuerzo es colectivo, y ello conlleva que la recuperación sea rápida y a un coste reducido. La *minga* es un mecanismo donde se transmite el sentimiento de trabajo comunitario y organización. Esta actividad pone de manifiesto una responsabilidad compartida tanto social como económica que fortalece la comunidad y produce resiliencia social frente a las amenazas naturales.

5. CONCLUSIONES

La comunidad Nasa poseía un modelo tradicional de gestión del riesgo basado en un conjunto de prácticas ancestrales desarrolladas durante el ciclo de vida del desastre (pre-, durante y post-desastre). Estas prácticas se articulaban sobre elementos supraestructurales ritualizados, fijados en la Ley de Origen y sostenidos sobre un concepto sacralizado de la naturaleza. El modelo ancestral de gestión del riesgo de las inundaciones súbitas desarrollaba actividades específicas. En la fase del pre-desastre, se identificaron seis actividades capaces de reducir la exposición al riesgo y regular el asentamiento territorial de la comunidad Nasa con el fin de evitar la creación de nuevos espacios de riesgo. En la fase de eclosión de la amenaza (durante), se identificaron tres actividades orientadas a prepararse y responder ante al evento. Por último, en la fase post-desastre, se identificaron dos actividades basadas en los principios de solidaridad: la comunidad Nasa se organiza para contribuir en la recuperación de las personas afectadas y se realizan armonizaciones para identificar y aprender de las acciones antrópicas que han influido en la ocurrencia y el impacto de las inundaciones súbitas. Una de las prácticas ancestrales más importantes es el cateo, pues se trata de una actividad ritualizada orientada tanto al beneficio socioeconómico de la comunidad como al fortalecimiento de la gestión del riesgo natural por inundaciones súbitas. Además, su implementación influye en las conductas y actitudes que determinan la localización de las residencias, los activos económicos (como los cultivos) y las infraestructuras, reduciendo la exposición al riesgo, y también evita la creación de nuevos espacios de riesgo y reduce la degradación ambiental. Por todo ello, el modelo ancestral de la gestión del riesgo ante inundaciones súbitas contribuye a la reducción de la exposición de la población, pues se han

[6] Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, una ronda hídrica o hidráulica se define como un área de especial importancia ecológica de dominio público inalienable, imprescriptible e inembargable que juegan un papel fundamental desde el punto de vista ambiental.

identificado un mayor número de actividades en la fase del pre-desastre (seis), que en el resto de fases (durante y post-desastre). Es decir, ser trata de un modelo de gestión del riesgo más preventivo que reactivo.

La implementación del etnoconocimiento en el modelo moderno de gestión del riesgo natural tiene dos grandes desafíos. En primer lugar, el cambio de paradigma político necesario para incorporar el etnoconocimiento en la gestión moderna del riesgo natural. En segundo lugar, comprender que el etnoconocimiento es holístico porque gestiona el territorio y las actividades que este abarca de forma integral y transversal. Con el fin de afrontar ambos retos y afianzar la sistematización y relevancia del etnoconocimiento en la gestión moderna del riesgo a nivel nacional, no solo es necesario y útil la articulación técnica de las prácticas ancestrales en el modelo actual de gestión del riesgo, también es necesaria una articulación social y política que reconozca y valore positivamente los saberes y derechos de la comunidad indígena Nasa. Esta doble articulación se ha visto limitada por los procesos de exclusión y marginación sociopolítica que ha padecido y padece hoy en día la comunidad indígena Nasa, primero por la conquista española y los procesos de evangelización, y en la actualidad por parte del Estado colombiano. Por lo tanto, la problemática de la integración de los saberes ancestrales en la gestión del riesgo no puede tratarse como un mero problema técnico-metodológico sino como un problema político-social asociado al reconocimiento de derechos y valorización de las poblaciones indígenas y sus bagajes culturales. Además, para mejorar la gestión del riesgo por inundaciones súbitas, es necesario comprender que el etnoconocimiento es holístico y requiere de la complementariedad de: prácticas, rituales, costumbres, cosmovisiones y culturas, de manera que para que sea eficaz, debe implementarse de forma total (actividades) y consensuada (tutelada por los *The Wala*).

REFERENCIAS

- Baas, S., Ramasamy, S., de Pryck, J. D. y Battista, F. (2009). Análisis de sistemas de gestión del riesgo de desastres, una guía. Serie sobre el Medio Ambiente y la Gestión de los Recursos Naturales, 13. FAO, Roma.
- http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/012/i0304s/i0304s01.pdf
- Boillat, S., y Berkes, F. (2013). Perception and interpretation of climate change among Quechua farmers of Bolivia: indigenous knowledge as a resource for adaptive capacity. *Ecology and society,* 18(4), 21.
- Castro, A. C., y Téllez, R. F. (2018). Explorando el origen de nuestros ancestros: El nacimiento del pueblo nasa: La historia de un genocidio. *Revista Republicana*, 24, 181-201.
- Dekens, J. (2007a). Herders of Chitral, the Lost Messengers?: Local Knowledge on Disaster Preparedness in Chitral District. European Commission founded project. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Pakistan. https://www.preventionweb.net/educational/view/8031
- Dekens, J. (2007b). Local knowledge for disaster preparedness: A literature review. European Commission founded project. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). https://www.preventionweb.net/publications/view/2693
- Espinosa Arango, M. L. (2007). Memoria cultural y el continuo del genocidio: lo indígena en Colombia. *Antípoda. Revista de antropología y arqueología*, 5, 53-73.
- Hernández, Á. L. H. (2004). Evolución política y legal del concepto de territorio ancestral indígena en Colombia. En: C. Castellano y O. L. Pérez (Eds.), *Derecho a la tierra conceptos, experiencias y desafíos.* ILSA, Bogotá.
- Hiwasaki, L., Luna, E., y Shaw, R. (2014). Process for integrating local and indigenous knowledge with science for hydro-meteorological disaster risk reduction and climate change adaptation in coastal and small island communities. *International journal of disaster risk reduction*, 10, 15-27.

- Iloka, N. G. (2016). Indigenous knowledge for disaster risk reduction: An African perspective. *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies*, 8(1), 272.
- Lin, P. S. S., y Chang, K. M. (2020). Metamorphosis from local knowledge to involuted disaster knowledge for disaster governance in a landslide-prone tribal community in Taiwan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, 101339.
- Magni, G. (2017). Indigenous knowledge and implications for the sustainable development agenda. European Journal of Education, 52(4), 437-447.
- Molina, J. G. J., y Neef, A. (2016). Integration of indigenous knowledge into disaster risk reduction and management (DRRM) policies for sustainable development: The case of the Agta in Casiguran, Philippines. En: J. I. Uitto y R. Shaw (Eds.), *Sustainable development and disaster risk reduction,* 247-264. Springer, Tokyo.
- Municipio de Corinto, Cauca (2001). *Esquema de ordenamiento territorial*.
- Municipio de Corinto, Cauca (2012). *Plan municipal de gestión de riesgo de desastres*.
- Semper, F. (2006). Los derechos de los pueblos indígenas de Colombia en la jurisprudencia de la Corte Constitucional. *Anuario de derecho constitucional latinoamericano*, *2*, 761-778.
- Rappaport, J. (2004). La geografía y la concepción de la historia de los Nasa. En: A. Surrallés y P. García-Herrero (Eds.), *Tierra Adentro*. Territorio indígena y percepción del entorno, 173-185. IWGIA, Lima.
- https://www.iwgia.org/images/publications//0331_tierra_adentro.pdf
- Resguardo Indígena Páez de Corinto. (2015). *Plan de Vida*. Corinto, Cauca, Colombia.
- Romero Medina, A. (2007). Pueblos indígenas e impunidad: Cuatro estudios de caso en Colombia. En: Aportes Andinos, 18, 22 p. Universidad Andina Simón Bolívar, Quito.
- Ulloa, F. (2011). Manual de gestión del riesgo de desastres para comunicadores sociales. Una guía práctica para el comunicador social comprometido en informar y formar para salvar vidas. UNESCO Office Lima, Lima.
- https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000219184
- Wilches, G. (2005). 10. El terremoto, la avalancha y los deslizamientos de la cuenca del río Páez, 1994. *Desastres*, 121.

ENSAYO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN SOCIAL DE LA AMENAZA: INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO JUQUERI, SÃO PAULO - BRASIL

Rodolfo Baesso Moura
mourabrodolfo@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2349-4587

Fernando Rocha Nogueira
fernando.nogueira@ufabc.edu.br
https://orcid.org/0000-0003-0814-4984

Rafael Costa e Silva
https://orcid.org/0000-0002-3044-2809

Samia Nascimento Sulaiman
https://orcid.org/0000-0001-5175-9621

Lucas Rangel Eduardo Silva
https://orcid.org/0000-0003-4101-759X

João Henrique José Vieira
https://orcid.org/0000-0002-9569-8389

Universidade Federal do ABC, Brasil

RESUMEN

Este ensayo presenta un ejercicio analítico sobre la perspectiva de que las amenazas son resultado de una construcción social donde las intervenciones humanas en el ambiente se vuelven acciones catalizadoras del desastre. Se hace una revisión preliminar del modelo PAR (*Pressure and Release Model*) que apunta a la construcción social del riesgo avanzando en el análisis de la vulnerabilidad como una progresión en el tiempo y espacio, pero que aún considera la amenaza como un elemento exógeno, natural. Por ello, se presenta un episodio de inundación significativo en la cuenca del río Juqueri, en la Región Metropolitana de São Paulo, Brasil, en 2016. Así, se indaga sobre qué tipos de acciones son aquellas que intensifican las amenazas y nos permiten ver la construcción social del riesgo, no solo a través de la progresión de la vulnerabilidad, sino ir más allá en la comprensión de la amenaza como proceso/fenómeno que se constituye también desde las acciones humanas catalizadoras que afectaron y que influyen a diferentes escalas.

1. INTRODUCCIÓN

La información más actualizada sobre desastres apunta a que las condiciones de cambio climático ya están instaladas. En el sureste de Brasil y, particularmente, por su mayor concentración urbana, la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP, en adelante) que concentra a unos 22 millones de personas (IBGE 2019) en poco menos de 8 mil km², ya se expresan episodios extremos de temperatura

y lluvia, una alta concentración de contaminantes debido a la baja dispersión del aire y una mayor incidencia de enfermedades infecciosas. Del lado de los procesos hidro y geodinámicos, ya podemos ver en las ciudades brasileñas grandes inundaciones con alto poder de arrastre y deslizamientos de tierra. Y, en contraste, largos períodos de sequía, que afectan el suministro de agua para la población y las actividades económicas (Nobre et al., 2010; Sulaiman et al., 2019).

Sin embargo, entre los tomadores de decisiones e incluso entre los expertos persiste la percepción de que estos fenómenos son exógenos a los caminos del desarrollo económico y social y no se conectan con las formas en las que el ser humano se apropia y modifica el medio ambiente. Los desastres son interpretados como resultado de *eventos extremos*, neologismo contemporáneo para expresiones como *fatalidades*, *castigo de los dioses* o *fuerzas de la naturaleza.* Lavell y Maskrey (2014, p. 272), al contrario, refuerzan la necesidad de "entender el riesgo de desastres como una característica holística y endógena de caminos y prácticas de desarrollo particulares, construido por medio de las decisiones cotidianas de quienes determinan los caminos y prácticas". Es decir que las inundaciones o las sequias, por ejemplo, hacen parte de un proceso sistémico y extenso, y los riesgos de desastre son un *defecto debido al mal uso antrópico* del medio ambiente, que afecta significativamente la calidad de vida, la economía y el desarrollo de toda la sociedad.

En la RMSP se puede identificar una red espacial amplia, compleja y densa de riesgos que son no solo ambientales sino también urbanos. Casi siempre, la causalidad de estos riesgos puede explicarse por el proceso de uso y ocupación del suelo y por la apropiación de los recursos naturales y, por lo tanto, puede interpretarse como resultado de la gestión insostenible del entorno urbano. En relación con las inundaciones, hay que entender la construcción social del riesgo que está muy claramente asociada con la impermeabilización casi absoluta del suelo, la alta concentración poblacional y la densidad edificatoria y la segregación socioespacial que empuja, a las poblaciones más pobres hacia fondos de valles, llanuras aluviales, no favorables a la ocupación.

El evento del 10 de marzo de 2019, con precipitaciones de más de 100 mm e inundaciones extensas en la cuenca del río Tamanduateí, en la RMSP, provocó el fallecimiento de cinco personas por deslizamientos de tierra y siete muertes por ahogamiento. Para Travassos et al. (2020), la precariedad o ausencia de infraestructura de las viviendas son relevantes para explicar esas muertes, así como la poca capacidad de las agencias de respuesta a emergencias y la falta de gobernanza frente a los impactos del cambio climático y manejo adaptativo. Las pérdidas económicas resultantes de las inundaciones se han estimado alrededor de 258 millones de euros (Ferraz, 2019). En respuesta, el gobierno del estado de São Paulo prometió construir otra cuenca artificial de retención de aguas pluviales. Ningún tomador de decisión y muy pocos expertos han señalado soluciones alternativas de permeabilidad, recomposición natural del cauce del río amurallado o devolver la llanura de inundación.

El foco en el evento extremo, en el desastre, oculta la causalidad social del riesgo y descualifica las medidas de prevención y respuesta manteniendo prácticas y políticas insostenibles, con soluciones insuficientes e ineficientes para enfrentar las amenazas, Lo que Lavell y Maskrey (2014, p. 272) han llamado de "*band-aid* que se aplica al desarrollo, un *airbag* que se infla (a menudo demasiado tarde) cuando hay una crisis, pero en otras circunstancias recibe muy poca atención o financiamiento". Este ensayo tiene como objetivo discutir la construcción social de la amenaza, con base en el análisis sobre las inundaciones como producto de prácticas de ingeniería e infraestructura urbana, y presentar un ejercicio analítico sobre las inundaciones en 2016 en una cuenca de la RMSP.

2. MÁS ALLÁ DE LA VULNERABILIDAD: LA AMENAZA SOCIALMENTE CONSTRUIDA

En las últimas décadas, se ha discutido la vulnerabilidad para asegurar la comprensión del riesgo como resultado de decisiones y elecciones humanas en la construcción histórica, política, social y económica de los territorios (Veyret y Richemond, 2007; Oliver-Smith et al., 2017; Canil et al., 2020). Como uno de los marcos más importantes para esta lectura, destacan las publicaciones de Blaikie, Cannon, Davis y Wisner (1994, 1996, 2004) con la progresión de la vulnerabilidad en las escalas temporal y espacial, con conceptos que ayudaron a basar el riesgo en un producto social. Varios autores utilizaron el análisis de la progresión de vulnerabilidad que basa el Modelo PAR (*Pressure and Release Model*), como Sulaiman (2014), Marchezini y Wisner (2017), Moura (2018), Moretti et al. (2020), Aznar-Crespo et al. (2020) para explicar la ocurrencia de desastres (materialización del riesgo) y su causalidad a través de la identificación de causas de fondo, presiones dinámicas y condiciones inseguras que componen la vulnerabilidad, pero no discuten la construcción de la amenaza.

Si entendemos conceptualmente el riesgo como una interdependencia mutua entre vulnerabilidad y amenaza (Nogueira, 2002), es posible identificar sus factores y su relación con la causalidad total del riesgo; es decir, la amenaza también se construye socialmente. Disociado, todavía, lleva al estigma del proceso natural, el elemento exógeno e impredecible. Para Hewit (1983), un enfoque naturalista de los desastres que se materializa en el lenguaje mismo: el uso de la palabra "evento" para referirse al desastre refuerza la idea de unidad en el tiempo y el espacio, una anomalía, que supera las voluntades y acciones humanas, y se mantiene de manera paradigmática en el campo de la reducción del riesgo de desastres - RRD, abordado brillantemente por Lavell y Maskrey (2014, p. 270-271):

> *La RRD como paradigma, sin embargo, continúa siendo impulsada por la noción cada vez más obsoleta de que los desastres son choques exógenos e imprevistos que afectan los sistemas económicos y las sociedades que funcionan normalmente, en lugar de indicadores endógenos de desarrollo fallido o distorsionado, de procesos económicos y sociales insostenibles e insanos y de sociedades mal adaptadas.*

Teniendo en cuenta que el modelo de progresión de la vulnerabilidad no logra superar esta barrera de desastres como un elemento exógeno para la sociedad, este ensayo tiene como objetivo contribuir a la desnaturalización de los desastres y a la comprensión de la causalidad de los riesgos a través de, también, la identificación del proceso de construcción social de la amenaza, a través de la revisión del modelo PAR. De un lado, el modelo presenta la progresión de la vulnerabilidad en tres escalas espaciales y temporales: *condiciones inseguras* (por ejemplo, ocupación de áreas inundables); que se relacionan con las *presiones dinámicas*, los procesos que produjeron ese escenario (por ejemplo, falta de políticas de inspección y regulación del uso de la tierra); y son resultado de *causas de fondo* basadas en el modelo de organización social y las ideologías del desarrollo urbano (por ejemplo, la política neoliberal) (Wisner et al., 1994; Nogueira et al., 2019). De otro lado, el modelo indica las amenazas (inundaciones, deslizamiento, sequía), como procesos naturales. El objetivo aquí es cuestionar este lado del modelo, destacando el papel desempeñado por la humanidad en las acciones catalizadoras de procesos o fenómenos que construyen las amenazas.

3. LAS INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO JUQUERI, SÃO PAULO: UN EJERCICIO ANALÍTICO SOBRE LAS INFLUENCIAS ANTROPICAS

Corroborando la idea de que un desastre debe discutirse más allá de la unidad de tiempo que marca su ocurrencia, la inundación de 2016 será analizada considerando la interdependencia entre los elementos físicos y socioeconómicos que conforman lo que los autores apuntan como parte de la construcción social de la amenaza.

3.1. Caracterización física

El río Juqueri nace en Serra Vermelha, ciudad de Nazaré Paulista, y tiene en la mayor parte de su llanura de inundación (676,61 km² de los 729.46 km²) las ciudades de Mairiporã, Franco da Rocha, Cajamar, Caieiras y Francisco Morato (Figura 1, área de estudio). Las cinco ciudades tienen 600,582 habitantes (IBGE 2019), en un área total de 731.50 km² y son parte de la RMSP. En la subcuenca hidrográfica Juqueri-Cantareira, las altitudes varían entre 687 metros, en la salida de la cuenca, a valores superiores a 1.300 metros en las áreas de origen del río principal. Asociada con el diseño litológico, la presencia significativa de áreas con pendientes cercanas o superiores al 30 % establece una dinámica para las aguas superficiales que influyen, en la susceptibilidad de las áreas a deslizamientos de tierra o inundaciones (IPT y CPRM, 2015, 2017).



Figura 1. Ubicación de las cinco ciudades conectadas al río Juqueri en la RMSP, Estado de São Paulo y Brasil. Fuente: elaboración propia.

Las inundaciones en esta subcuenca están influenciadas por el régimen de lluvias del área, que se divide en un período de sequía (entre abril y septiembre) con una precipitación promedio de 343.6 mm, y una época de lluvia, que alcanza 1094.7 mm. Tarifa y Armani (2001) definen el clima de esta región del Alto Juqueri como altitud húmeda tropical, cuyas llanuras de inundación y terrazas tienen un gran potencial de inundación porque reciben parte del agua drenada por las laderas de la Serra da Cantareira, Vermelha y Jaraguá que se une a la precipitación media anual alta. Condiciones morfológicas de la cuenca y los aspectos climatológicos diseñan un escenario favorable para la ocurrencia de inundaciones. Además, la ocupación urbana se establece en áreas de susceptibilidad media y alta a las inundaciones (Figura 2). A partir de estos elementos, es necesario comprender más que aspectos del entorno físico. ¿Quiénes son las personas que ocupan este territorio?



Figura 2. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones para el área de estudio. Fuente: adaptado de IPT y CPRM (2015, 2017).

3.2. Caracterización socioeconómica

La expansión urbana metropolitana se formó en la región desde la mitad de la década de 1960, acentuada por el rápido crecimiento de la población entre las décadas de 1980 y 2000. Las ciudades de la subcuenca Juqueri-Cantareira tienen densidades de población distintas: más pobladas en los casos de Caieiras, Francisco Morato y Franco da Rocha, o con centros urbanos fragmentados, como en Mairiporã y Cajamar (Figura 3).

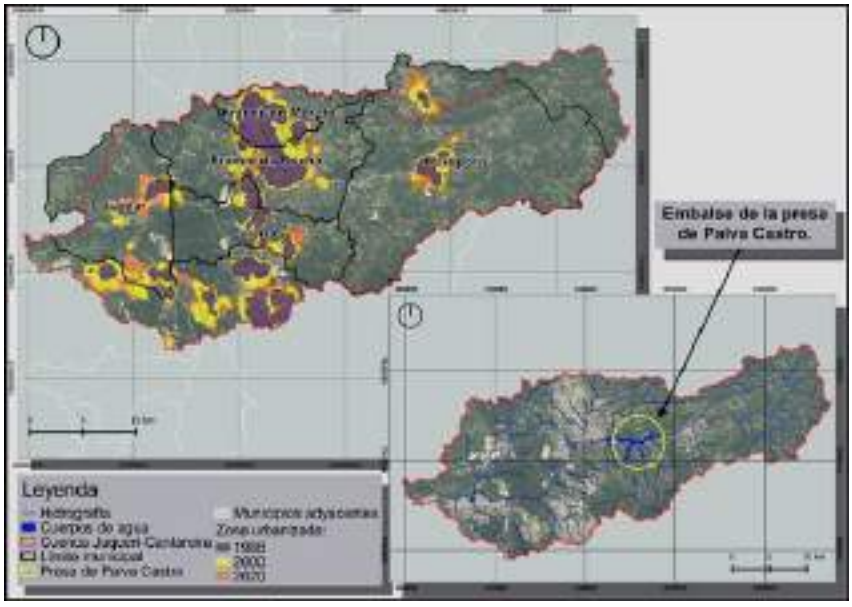


Figura 3. Mancha urbana en 1988, 2000 y 2020. Fuente: adaptado de Angel et al. (2016).

En 2010, las cinco ciudades tenían 148 mil hogares y de este total, aproximadamente 6 mil estaban ubicados en asentamientos precarios (subdivisiones irregulares o *favelas*), con un promedio de 3.7 residentes por hogar (IBGE 2011). Esos asentamientos son la consecuencia de una segregación urbana, donde los trabajadores de las clases populares, sin acceso financiero a viviendas en los centros urbanos, construyeron con sus manos su propia vivienda, en general con baja calidad constructiva, y vulnerable, por ejemplo, a inundaciones (Figura 4). Además del patrón de construcción de viviendas

y el proceso de urbanización similar en las cinco ciudades, todos tienen en común el hecho de que son consideradas ciudades dormitorio, con desplazamientos impulsados por la demanda de educación, salud y ofertas de trabajo en la capital de São Paulo, una vez que el mercado laboral local no puede absorber a toda la población económicamente activa.

Los indicadores de ingresos muestran la situación de desigualdad en las ciudades de la subcuenca. A principios de la década de 2010, aproximadamente 37 mil residentes, aproximadamente el 7 % de la población, sobrevivían con un promedio de ingreso per cápita de una cuarta parte del salario mínimo, aproximadamente 21 €. Parte de esta desigualdad de ingresos se explica por el nivel educativo. Un tercio de los residentes de las ciudades no tenían estudios o no habían completado la escuela primaria. El número insignificante de universidades públicas y privadas ubicadas en la región es un factor que contribuye a comprender por qué, en 2010, menos de 5 % de la población local, la gran mayoría blanca, poseía un diploma de Educación Superior.



Figura 4. (A) Grafiti en el centro de Franco da Rocha: “Por aquí rio vuelve zona peatonal, avenida a veces (vuelve) rio, mi ciudad es el rostro de Brasil” (André Arruda). Fuente: LabGRis-UFABC, 2019. (B) Imagen de una localidad con casas de baja calidad constructiva en área inundable en Jardim União, Franco da Rocha.

El Índice Paulista de Vulnerabilidad Social (IPVS) busca identificar el grado de vulnerabilidad de la población de las ciudades del Estado de São Paulo a través de variables socioeconómicas y demográficas (SEADE, 2010). Según el IPVS, 20 % de la población total de las cinco ciudades está expuesto a una vulnerabilidad media, 26 % a una vulnerabilidad alta y el 4 % a una vulnerabilidad social muy alta. Los datos presentados son puntos de partida para el análisis de las innumerables dimensiones de la pobreza y la segregación socioespacial y sirven como input informacional para la elaboración de políticas públicas sectoriales y planes de ordenación, instrumento básico de la política de desarrollo municipal para la toma de decisiones.

En general, esos planes reconocen que parte de sus poblaciones están segregadas y viven en condiciones precarias y que los proyectos de vivienda pueden proporcionar una mejor calidad de vida para los residentes y salvaguardar las áreas de interés ambiental de las presiones ejercidas por ocupaciones irregulares y expansiones desordenadas. Sin embargo, a pesar de las preocupaciones sobre la expansión urbana, el área urbana de los cinco municipios casi se ha duplicado en tamaño en los últimos 30 años (Figura 3). Las ciudades dirigen este proceso creando áreas urbanas mixtas, industriales y de ocupación dirigida a áreas previamente clasificadas como de interés ambiental, de uso sostenible o bosque natural, contribuyendo a la expansión de la mancha urbana en áreas susceptibles a procesos de inundación.

3.3. Las inundaciones de marzo de 2016 en la cuenca del río Juqueri

En ese territorio, un evento extremo, sumado a las condiciones físicas y socioeconómicas presentadas hasta el momento, causó un desastre en marzo de 2016, con grandes pérdidas sociales, económicas y ambientales. Ese mes ha sido el marzo más lluvioso en la serie histórica correspondiente al período de 1963 a 2018 y tuvo 394.8 mm de precipitación, fuera del promedio de 167 mm esperado. Esta lluvia se concentró en la primera mitad del mes, pero entre la tarde del 10 y la tarde del 11 de marzo, la operación de una zona de humedad de convergencia, asociada con el paso de un frente frío, causó acumulaciones de precipitación de 120 a 155 mm en diferentes puntos de la región norte de la RMSP.

Estas serían condiciones suficientes para la ocurrencia de los procesos de inundación habituales. Sin embargo, en esa ocasión, la empresa público-privada responsable de la gestión del embalse Paiva Castro (Figura 3) guiada por su plan de contingencia, como una forma de evitar el desbordamiento o la ruptura de la presa, abrió las compuertas. Esa medida hizo aumentar el flujo del río Juqueri y propició alcanzar el punto de inundación de las ciudades aguas abajo, con consecuencias más graves para las áreas centrales de Franco da Rocha (Figura 5) (Pinho y Leite, 2016; Mendonça, 2016).

Aunque la apertura de las compuertas para proteger la presa haya sido una acción de emergencia, esa medida causó un daño enorme a las ciudades aguas abajo que ya presentaban limitaciones de comunicación con la sociedad, grupos sociales vulnerables y la falta de preparación institucional para enfrentar este enorme flujo de salida. Además del daño registrado en el centro de Franco da Rocha, se produjeron múltiples impactos locales asociados con inundaciones y deslizamientos de tierra que provocaron la muerte de 19 personas en la región (Mendonça 2016).



Figura 5. Inundación en el centro de Franco do Rocha en el 11 de marzo de 2016. Fuente: Marcel Naves, periódico El País, 2016.

3.4. Las acciones catalizadoras de la construcción social de las inundaciones de 2016

La investigación de la progresión temporal-espacial de la amenaza destaca *acciones catalizadoras* para la construcción social de amenazas. En el modelo PAR son descritas originalmente 7 amenazas (terremoto, vientos fuertes, inundaciones, erupción volcánica, deslizamiento, sequía y virus y pestes) que en este artigo serán clasificados como *procesos/fenómenos* (UNISDR, 2016), para que se supere la perspectiva de eventos naturales que causan daños para una propuesta interpretativa de interacción entre a) *procesos/fenómenos* que categorizamos como Biológico (p.ej. epidemias), Ambiental (p.ej. contaminación atmosférica), Geológico y Geofísico (p.ej. deslizamientos de tierra), Hidrometeorológico (p.ej. inundaciones) y Tecnológico (p.ej. explosión nuclear) y b) *acciones*

catalizadoras de origen humana (Chen et al., 2015; IDEAM et al., 2017), que categorizamos en las dimensiones de: Seguridad Alimentaria (p.ej., uso de pesticidas); Recursos Hídricos (p.ej., consumo elevado de agua); Servicios de Biodiversidad y Ecosistemas (p.ej. deforestación); Salud (p.ej. incredulidad en la medicina); Hábitat Humano (p.ej. movidas de suelo); e Infraestructura (p.ej. embalse), como se presenta en la Figura 6.

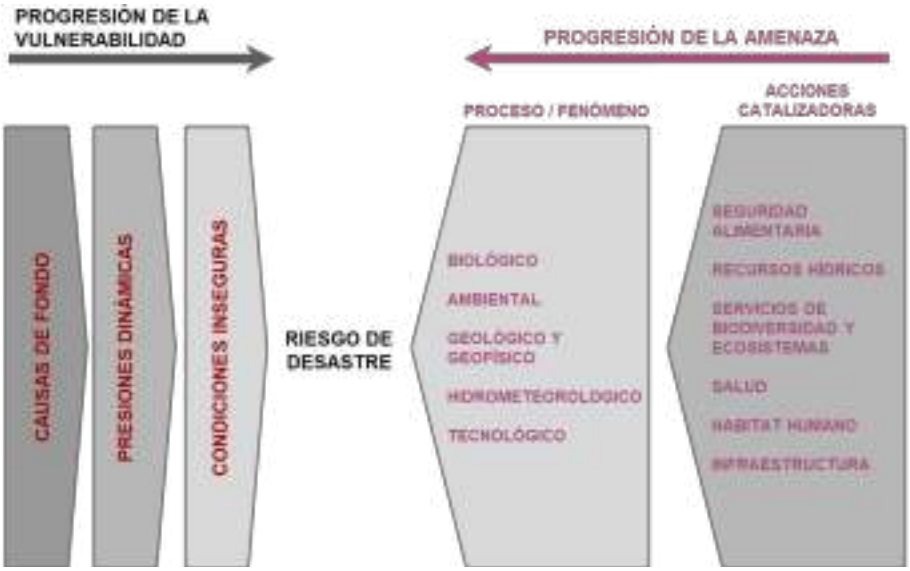


Figura 6. Modelo PAR con la propuesta de progresión de la amenaza incluyendo las acciones catalizadoras. Fuente: elaboración propia.

Esa propuesta preliminar de complementación del Modelo PAR, con la perspectiva de construcción social de la amenaza, se puede usar para analizar la causalidad de un episodio de inundación significativo en la cuenca del río Juqueri, en la RMSP, en 2016. De este modo se incide en que no solo las lluvias y la presencia del río Juqueri han causado y aún causan inundaciones en la RMSP. A partir de los elementos expuestos, sería posible descomponer el desastre y explorar la causalidad de la vulnerabilidad (con sus *causas de fondo*, *presiones dinámicas* y *condiciones inseguras)*. Pero también se puede ir más allá en la comprensión de la amenaza, categorizando el *proceso/fenómeno* y sus *acciones catalizadoras* que lo influenciaron e influencian a diferentes escalas.

Se puede evaluar, en un primer análisis, que el *proceso hidrometeorológico* que causó las inundaciones en 2016 tiene, como acciones catalizadoras, aquellas relacionadas con

(I) el *hábitat humano* - a escala regional y local, lo cambio climático que produce eventos extremos, intensificados por la producción de gases de efecto invernadero, a escala local, desde el uso y la ocupación del suelo, con el crecimiento y el apoyo de los planes locales para la propagación de la mancha urbana, generan áreas más impermeables, rectificando canales fluviales, manteniendo áreas densamente urbanizadas en llanuras de inundación y ríos sedimentados mediante el movimiento del suelo;

(II) *las infraestructuras* y *recursos hídricos*, desde la ubicación, construcción y operación de la presa Paiva Castro hasta la decisión de abrir las compuertas en casos de emergencia y la incapacidad de comunicar esta decisión a la población que se le presentó, reflejando el aislamiento de los agentes públicos de la sociedad a la que prestan servicios.

La discusión sobre la cuenca del río Juqueri, sus características físicas y socioeconómicas y la ocurrencia del desastre de 2016 ayudan a comprender qué tipos de acciones son aquellas que intensifican las amenazas y nos permiten ver la construcción social del riesgo no solo a través de la

progresión de la vulnerabilidad. Para los autores, son importantes los momentos de revisión y adaptación de los conceptos para la futura actualización del modelo, una necesidad ya señalada por uno de sus creadores (Wisner, Gaillard y Kelman 2012), lo que indica que la acción antrópica, relacionada con presiones dinámicas y condiciones inseguras, puede intensificar algunas (no todas) las amenazas.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Este ensayo tenía la intención de avanzar en la discusión de la construcción social de la amenaza y un análisis crítico del modelo PAR de referencia para comprender la construcción social del riesgo. Todavía hay un largo camino por recorrer para actualizar el modelo PAR a partir de la discusión sobre la progresión de la amenaza. Este ensayo plantea algunas posibilidades e ideas para la discusión y la profundización. El empleo, de la construcción social de vulnerabilidades y amenazas es indispensable para desnaturalizar y comprender los riesgos y desastres como procesos resultantes del desarrollo insostenible de nuestra sociedad.

REFERENCIAS

- Angel, S., Blei, A. & Parent, J. (2016). *Atlas of urban expansion - 2016 edition. Areas and densities*. NYU Urban Expansion Program at New York University, UN-Habitat, and the Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, MA.
- Aznar-Crespo, P., Aledo, A. & Melgarejo-Moreno, J. (2020). Social vulnerability to natural hazards in tourist destinations of developed regions. *Science of the Total Environment*, 709, 135870.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. & Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad: El Entorno Social, Politico y Economico de los Desastres* [traducción de: At Risk (1994)]. La RED, Lima.
- Canil, K., Lampis, A. & Santos, K. L. (2020). Vulnerabilidade e a construção social do risco: uma contribuição para o planejamento na macrometrópole paulista. *Cadernos Metrópole* [s.l.], 22, 48, 397-416.
- Chen, C., Noble, I., Hellmann, J., Coffee, J., Murillo, M. & Chawla, N. (2015*). University of Notre Dame Global Adaptation Index. Country Index Technical Report*. University of Notre Dame, Indiana.
- Ferraz, Y. (2019, 17 de março) Em uma semana, região perde R$1,6 bilhão com chuvas. *Diário do Grande ABC*.
- Hewitt, K. (1983). Interpretations of Calamity. Mass Allen & Unwin, Boston.
- IBGE. (2011). *Censo demográfico*. Rio de Janeiro.
- IBGE. (2019). *Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente*. Rio de Janeiro.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP & CANCILLERÍA. (2017). *Análisis de vulnerabilidad y Riesgo por cambio climático en Colombia*. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, Bogotá.
- IPT, CPRM. (2015*). Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações - Relevo – Mun. Caieiras, Francisco Morato e Mairiporã - SP*. Escala 1:25.000.
- IPT, CPRM. (2017). *Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações - Relevo - Município de Cajamar e Franco da Rocha - SP*. Escala 1:25.000.
- Johnson, J. (2020, 22 de junho). *'This Scares Me,' Says Bill McKibben as Arctic Hits 100.4°F - Hottest Temperature on Record*. Common Dreams.
- Lavell, A. & Maskrey, A. (2014). The future of disaster risk management. *Environmental Hazards*, 13(4), 267-280.
- Marchezini, V. & Wisner, B. (2017). Challenges for vulnerability reduction in Brazil: insights from the PAR framework. In: V. Marchezini, B. Wisner & S. Saito (Eds.), *Reduction of*

vulnerability to disasters: from knowledge to action, 57-96. Rima, São Carlos.
- Mendonça, H. (2016, 11 de março). Chuvas em São Paulo deixam mortos e cidades debaixo d'água. *El País.*
- Moretti, R. et al. (2020). Risco, vulnerabilidades e tomada de decisão: reflexões a partir da COVID- 19. *Diálogos Socioambientais na Macrometrópole*, 3(6), 30-32.
- Moura, R. B. (2018). *Análise pós-desastre no município de Angra dos Reis, RJ: uma contribuição para elaboração de indicadores de resiliência*. Dissertação (Mestrado), Curso de Planejamento e Gestão do Território, UFABC, Santo André.
- Nobre, C., Young, A. F., Saldiva, P. H. N., Marengo, J. A., Nobre, A. D., Alves JR., S., Moreira da Silva, G. C. & Lombardo, M. (2010). *Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo, Sumário Executivo*, 32 p., São Paulo.
- Nogueira, F. R. (2002). *Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamento: contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal*. Tese (Doutorado), Inst. Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro.
- Nogueira, F. R. et al. (2019). Sobre as componentes do risco: discutindo a construção social do perigo. In: CBRRD, *3., Belém. Anais CBRRD*.
- Oliver-Smith, A., Alcántara-Ayala, I., Burton, I. & Lavell, A. (2017). A construção social do risco de desastres: em busca das causas básicas. In: V. Marchezini, B. Wisner & S. Saito (Eds.), *Reduction of vulnerability to disasters: from knowledge to action*, 97-114. Rima, São Carlos.
- Pinho, M. & Leite, I. (2016, 16 de março). Moradores dizem que alerta chegou horas após abertura de comportas. *G1*.
- SEADE. (2020). *Índice Paulista de Vulnerabilidade Social*. São Paulo.
- Sulaiman, S. N. (2014). *De que adianta? O papel da educação para prevenção de desastres naturais*. Tese (Doutorado), FEUSP/IUACA, São Paulo, Alicante.
- Sulaiman, S. N. et al. (2019). Risco, Desastre e Adaptação na MMP. In: P. Torres, *Governança e Planejamento Ambiental: adaptação e políticas públicas na Macrometrópole Paulista*, 152-160. Letra Capital, São Paulo.
- Tarifa, J. R. & Armani, G. (2001). Os Climas Naturais. In: J. R. Tarifa & T. R. Azevedo (Org.), *Os Climas da Cidade de São Paulo: teoria e prática*. GEOUSP, São Paulo.
- UNISDR (Org.). (2016). *Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction*. Genebra.
- Travassos, L., Campello Torres, P. H., Di Giulio, G., Jacobi, P. R., Dias De Freitas, E., Siqueira, I. C. & Ambrizzi, T. (2020). Why do extreme events still kill in the São Paulo Macro Metropolis Region? Chronicle of a death foretold in the global south. *International Journal of Urban Sustainable Development*.
- Turner, J., Guarino, M. V., Arnatt, J., Jena, B., Marshall, G. J., Phillips, T., Bajish, C. C., Clem, K., Wang, Z., Andersson, T., Murphy, E. J. & Cavanagh, R. (2020). Recent decrease of summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 47. https://doi.org/10.1029/2020GL087127
- Veyret, Y. & Richemond, N. M. (2007). Definições e vulnerabilidades do risco. In: Y. Veyret (Org.), *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*, p. 25-46 [tradutor Dilson Ferreira da Cruz]. Contexto, São Paulo.
- Wisner, B., Gaillard, J. C. & Kelman, I. (2012). *Handbook of hazards and disaster risk reduction*. Routledge, London.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. & Davis, I. (1994, 2004). *At Risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge, London

PROGRAMA DE EDUCACIÓN INFANTIL EN EL RIESGO DE INUNDACIONES 'VENERO CLARO-AGUA' (ÁVILA)

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

Mario Hernández Ruiz
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
m.hernandez@igme.es
https://orcid.org/0000-0002-4088-2269

Pablo Díez Marcelo
Colegio Claret Segovia, España
p10@inundacion.es

Carlos Carrera Torres
Fundación Ávila, España
carloscarrera@fundacionavila.es

RESUMEN

El programa de educación no formal 'Venero Claro-Agua' (2013-actualidad) es un conjunto de actuaciones dirigidas a niños y preadolescentes, orientado a concienciar a la población infantil de la importancia de la prevención de los desastres naturales, y en particular del riesgo por avenidas e inundaciones. Las actuaciones consisten en actividades formativas diversas (juegos grupales, concursos, charlas, manejo de instrumental, videojuegos...) que se llevan a cabo con grupos de niños que participan en los campamentos estivales en la Colonia infantil 'Venero Claro' (Fundación Ávila), situada en plena Sierra de Gredos, a orillas del río Alberche, en el término municipal de Navaluenga (provincia de Ávila). A lo largo de las siete ediciones anuales de la actividad han pasado por los campamentos y han participado en este proyecto educativo más de 3.700 jóvenes (unos 540 por edición anual) de diferentes procedencias geográficas de toda España. La valoración de las actividades por los participantes, en las encuestas realizadas anualmente por la organización de los campamentos infantiles, no puede ser más positiva, estando considerada una de las actividades más divertidas e interesantes por los jóvenes; y ha sido probada su eficacia.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las inundaciones y sus riesgos asociados es un claro ejemplo de interdisciplinaridad científica, porque su análisis y prevención implica a diversas disciplinas del ámbito de las Ciencias de la Tierra (Meteorología, Hidrología, Hidráulica, Geología, Geomorfología, Geografía Física...) y de las Técnicas (Ingeniería Topográfica, Ingeniería Civil, Ingeniería Forestal...); pero también del ámbito de las Ciencias Sociales y Humanidades (Sociología, Economía, Geografía Humana, Psicología Ambiental, etc.). A pesar de la trascendencia socioeconómica de las inundaciones y de la multidisplinaridad científica de su estudio, la concienciación de la población en general sobre las disciplinas ocupadas del estudio y prevención de las inundaciones es muy limitada, y en muchos aspectos inexistente, con predominio de los prejuicios y las creencias que en ocasiones rozan con la

superstición. Tampoco es más esperanzadora la formación científica en estas materias que reciben los jóvenes en edad escolar (Enseñanza Infantil, Enseñanza Primaria y Enseñanza Secundaria), por no estar adecuadamente desarrolladas en los curricula de asignaturas como Conocimiento del Medio, Ciencias de la Naturaleza o Biología y Geología; que se limitan a tratar aspectos generales del ciclo del agua o del funcionamiento básico de los ríos (ver temarios de los cursos de 3º EPO a 1º ESO).

Por todo lo anteriormente expuesto, es necesario incrementar la concienciación de la población relacionada con las disciplinas que abordan el análisis y prevención del riesgo por avenidas e inundaciones; y no sólo por objetivos académicos, sino por motivos prácticos que entroncan con la seguridad personal. Los objetivos generales este tipo de actuaciones de educación en el riesgo dirigida a la población infantil deberían ser:

- Incrementar la concienciación ambiental, la cultura científica, tecnológica e innovadora de la sociedad española, a través de su población infantil y juvenil en edad escolar, que es como mejor se llega al conjunto de las familias, y se siembra la semilla de la conciencia ambiental en los adultos del futuro.
- Incrementar la difusión de los resultados de investigación científico-técnica y de la innovación relacionadas con el agua, financiados con fondos públicos.
- Fomentar e incentivar el acercamiento de la ciencia, la tecnología y la innovación a los ciudadanos acortando distancias entre el mundo científico y tecnológico y la sociedad en general. Concretamente llevando al ámbito del ocio y el tiempo libre las fuentes de datos, métodos y forma de trabajar del científico, a través de prácticas y juegos, que acercan a los ciudadanos el instrumental científico y su utilidad.
- Mejorar la educación científico–técnica de la sociedad en todos los niveles. Impulsar la participación activa de la sociedad en actividades de divulgación científica. Apoyar la labor de divulgación científica realizada por las Unidades de Cultura Científica y de la Innovación y los museos y centros científicos y tecnológicos.

2. EDUCACIÓN EN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN VENERO CLARO (2013-2019)

La actuación denominada 'Venero Claro-Agua' ha consistido en las siete ediciones anuales celebradas (2013-2019) en un programa de actividades formativas en materia de Ciencias de la Tierra (fundamentalmente Geología, Meteorología e Hidrología) enfocado a la educación en los riesgos por avenidas e inundaciones y dirigido al público infantil (Díez-Herrero *et al.*, 2018).

Todas las actividades han sido programadas y ejecutadas por investigadores científicos y tecnólogos especialistas en el análisis y la gestión sostenible de los riesgos por avenidas e inundaciones del Instituto Geológico y Minero de España (Ministerio de Ciencia e Innovación); en perfecta coordinación con el equipo de coordinadores y monitores de tiempo libre del campamento infantil (Fundación Ávila); y han contado con la colaboración de profesores y alumnos en prácticas de otras universidades y centros de investigación (UCLM, UCM, UMa, UA, UPM, UVa, UEM...).

2.1. Fechas y lugar de realización

Todas las actividades se desarrollan durante las vacaciones escolares del verano, entre finales de junio y principios de septiembre, abarcando un periodo de aproximadamente dos meses y medio cada año.

Todas las actividades se realizarán en la Colonia Infantil de Venero Claro, situada en el paraje homónimo de la vertiente septentrional de la Sierra del Valle (término municipal de Navaluenga, provincia de Ávila, comunidad autónoma de Castilla y León). Se ubica concretamente en la margen derecha del arroyo Cabrera, un torrente afluente del río Alberche en la cola del embalse del Burguillo. Se trata de un amplio recinto con edificios para alojamiento en residencia, zonas comunes (comedor, patios, aulas...), instalaciones deportivas (piscina, campo de fútbol, pistas de tenis, baloncesto,

voleibol...) y zonas ajardinadas con arbolado y amplias superficies de césped y matorral. Todo el complejo es propiedad de la Fundación Ávila, quien lo construyó y explota desde hace casi 40 años, teniendo su uso arrendado a la empresa privada durante el invierno, para formación de sus directivos, técnicos y comerciales (Vector Academy).

Parte de las instalaciones del complejo de Venero Claro se encuentran dentro de las zonas inundables con periodo de retorno de 500 años, sin que afecte a ninguna instalación con riesgo para los usuarios. Precisamente por esta circunstancia, y por haberse producido allí un importante evento torrencial catastrófico la noche del 17 al 18 de diciembre de 1997, este lugar ha sido objeto de estudios científicos que lo llevan a ser uno de los entornos mejor conocidos de España y de Europa, a través de decenas de publicaciones en revistas científicas internacionales, capítulos de libros, comunicaciones a congresos, tesis doctorales y trabajos de fin de máster. En relación con estos estudios, se ha ido instalando y mejorando, en los últimos 15 años, una red de monitorización hidrometeorológica, densamente instrumentada, que ha convertido a esta cuenca piloto en un referente a nivel nacional e internacional.

Las evidencias de su inundabilidad (geomorfológicas y dendrocronológicas), el material derivado de todos estos estudios, y el abundante instrumental hidrometeorológico (pluviómetros, limnímetros, estaciones meteorológicas completas automáticas, TDRs…), constituyen unos recursos didácticos y de divulgación científica de alta potencialidad para ser utilizados en las actividades de mejora de la cultura científica.

2.2. Público destinatario

El público destinatario son los niños y niñas que asisten a los diferentes turnos de los campamentos estivales en Venero Claro, en periodos que oscilan entre los 11 y 15 días, en grupos de unos 180 jóvenes, correspondientes a diferentes colectivos: colegios (Jesús María, de Madrid), colectivos de clientes de entidades bancarias (Bankia) y clubes deportivos para tecnificación.

En total, los veranos de 2013 y 2019 han asistido a los campamentos unos 540 niños, con edades entre los 7 y 13 años (entre 2º EPO y 1ºESO). El origen de residencia de los asistentes, si bien puede ser procedente de toda España, se concentra fundamentalmente entre la provincia de Ávila y la Comunidad de Madrid.

El hecho de que este público objetivo esté desarrollando actividades de ocio y tiempo libre, hace que estas actuaciones en el ámbito de la educación no formal (fuera del curriculum académico), y puedan conseguirse mayores éxitos de asimilación e implicación, porque perciben el aprendizaje científico como parte de un juego o experiencia, y no como una materia sujeta a examen.

Además, teniendo en cuenta que se entrega material divulgativo (díptico, folleto, DVDs…) y que los juegos son verdaderamente singulares, es probable que la repercusión de la actividad se multiplique con el retorno de los niños y niñas con sus familias, por lo que el impacto esperable de la actuación puede que alcance del orden de 1.500 personas por edición.

2.3. Descripción de las actividades de la actuación

A modo de ejemplo del tipo de actividades que se realizarán durante los talleres, juegos y visitas, ilustradas con fotografías de cuando se realizaron en años anteriores (ver anexo fotográfico):

- **Juego didáctico-científico '*No es granito todo lo que reluce*'**. Consiste en un juego colectivo para enseñar a los niños y jóvenes un aspecto fundamental de las Ciencias de la Tierra: la constitución geológica del subsuelo en el que están conviviendo; o sea diferenciar los distintos tipos de granitoides sobre los que se sitúa el campamento de Venero Claro. Para ello, previas unas

indicaciones básicas, se les invita a situarse de pie en un espacio abierto (pradera, patio o similar), formando un gran triángulo equilátero, en cuyos vértices están la persona más alta (que simula el mayor contenido en cuarzo), la persona más baja y morena (que simula el mayor contenido en feldespatos plagioclasas) y la persona más baja rubia (que simula el mayor contenido en feldespatos potásicos). El resto de los participantes se situará de pie dentro del triángulo gigante (Fig.1), en función de su mayor o menor altura y según el color de su pelo; con lo que aprenden el manejo de las clasificaciones triangulares, tan utilizadas en diversas disciplinas científicas. Posteriormente, cada conjunto de personas se asigna a una tipología de rocas (granito, dioritas, sienitas, leucogranitos…), mostrándoles piezas de estas rocas, para que vean el parecido de coloración al de su pelo o su contenido en cuarzo.

- **Taller "*¿Cómo funciona ese cacharro?*"**. Consiste en un taller de manejo detenido de toda una serie de instrumental científico utilizado para la adquisición de datos hidrometeorológicos. Se les muestra y deja manipular: un pluviómetro digital de cazoletas; un limnímetro piezorresistivo; un molinete de medida de la velocidad del agua en los ríos (Fig.2); una estación meteorológica completa automática; una barrena Pressler para obtención de testigos de árboles; etc.
- **Visita "*Así curran los científicos del agua*"**. Consiste en una visita a algunas de las instalaciones y aparatos instalados dentro de la Colonia Infantil o en sus inmediaciones, con los que los científicos de diversos OPIs y universidades, realizan habitualmente sus trabajos (Fig.3). No sólo se muestra cómo están instalados y por qué se instalaron allí, sino también cómo se descargan los datos y qué estudios se realizan con ellos, de forma que los niños y niñas comprenden el ciclo completo de un estudio científico en el ámbito del análisis y la prevención del riesgo por avenidas e inundaciones.
- **Concurso "*¿Qué hago si me veo en una inundación?*"**. Consiste en un concurso de preguntas y respuestas, a modo de Trivial, sobre cómo actuar para autoprotegerse en caso de verse inmerso en un evento de inundación. Cuestiones sobre cómo moverse, dónde refugiarse, a qué sitios acudir y a cuáles no, los teléfonos de emergencias, las precauciones a adoptar, e incluso los consejos a dar a sus padres si están en un vehículo, constituyen el núcleo del concurso (Fig.4). Los premios para las personas y subgrupos acertantes son simples regalos del tipo DVDs divulgativos, pegatinas y bolígrafos.
- **Práctica científica "*Cuando el río suena a Rolling Stones*"**. Consiste en una práctica de inicio de la investigación científica, mediante el método científico, en el que los grupos de niños realizan una observación (los cantos del lecho del río que atraviesa la colonia están redondeados), plantean una hipótesis (el transporte del río es quien los ha redondeado), diseñan un experimento (marcaje con pintura de los cantos para observar si se mueven y cuánto) y lo ejecutan (miden y pesan los cantos antes de pintarlos, para ver la influencia de estos parámetros). Finalmente, observando el resultado del experimento de los jóvenes del año anterior, pueden confirmar o refutar su hipótesis.



Figura 1. Juego didáctico-científico 'No es granito todo lo que reluce' (2017).



Figura 2. Probando el medidor de velocidad de la corriente (micromolinete) con la fuerza de los soplidos. Taller *"¿Cómo funciona ese cacharro?"* (2017).



Figura 3. Jugando a "*Riadas escritas en los árboles*" (2016).



Figura 4. Concurso "¿Qué hago si me veo en una inundación?" (2017)

2.4. Recursos humanos y materiales empleados

Para el desarrollo de la actuación se emplean diferentes recursos humanos y materiales:

- **Recursos humanos**: monitores con la titulación de tiempo libre, con experiencia en grupos de menores y dinámicas de juegos, pero con formación específica en aspectos de divulgación científica y conocimientos de hidrología y geomorfología. Además, participan científicos y científicas de OPIs y Universidades que realizan sus proyectos en Venero Claro, integrados en el Grupo de Investigación RIADA) dirigido por Andrés Díez Herrero y Mario Hernández Ruiz (IGME); y la colaboración puntual de la Carolina Guardiola Albert (IGME) y José María Bodoque (UCLM), alumnos en prácticas profesionales de máster y grado, entre otros muchos.
- **Recursos materiales**: finca del complejo de Venero Claro próximo al río, instalaciones necesarias (aulas, laboratorios, zonas ajardinadas), instrumental científico (de la propia red de monitorización y otros aparatos no instalados), aparatos domésticos (flexómetro, báscula de cocina, etc.), pequeño material fungible (pintura, máscaras, guantes…), material de oficina (papel, bolígrafos, etc.), muestras pétreas variadas, carpetas con láminas DIN A-3 o tabletas digitales de grandes dimensiones, pequeños obsequios (DVDs divulgativos, pegatinas, etc.). Entre estos últimos recursos materiales destaca el DVD con videograbación del documental "*Piqueto y las avenidas torrenciales*" (IGME, 2009), que fue galardonado con el premio 'Ciencia en Acción 2010' al mejor documental de divulgación científica.



Figura 5. Materiales divulgativos y didácticos empleados en la actividad en dos ediciones diferentes.

3. NUEVAS INICIATIVAS EN LA EDUCACIÓN EN EL RIESGO (2019-2020)

Las estrategias y los recursos en la divulgación y educación han evolucionado en el tiempo en paralelo al desarrollo y consolidación de la pedagogía. En pleno siglo XXI, campos como la educación en la prevención de los desastres naturales, y herramientas como los videojuegos deben complementar a las técnicas y estrategias de enseñanzas clásicas. Por ello, desde hace dos años, un equipo multidisciplinar está desarrollando recursos divulgativos y didácticos sobre educación en los riesgos naturales, y en particular el riesgo de inundación, utilizando el popular videojuego infantil *Minecraft* (Díez-Herrero *et al.*, 2019a y b).

Minecraft es un videojuego infantil y juvenil (PEGI 7), creado en 2009, con más de 170 millones de usuarios en el Mundo, que es de tipo 'creativo' (*sandbox*), esto es, que permite crear paisajes y relieves (llamados 'mundos') a partir de elementos de construcción ('bloques' cúbicos de diferentes tipos de materiales). Puede ser utilizado tanto de forma divulgativa en el ocio y tiempo libre, como para la enseñanza formal y no formal, como ya es usado en diversos centros educativos de todo el mundo, incluido nuestro país.

Para conseguir la educación en el riesgo por avenidas e inundaciones, se ha contratado un servidor llamado '*Minecraft* Venero Claro' (IP 173.249.35.60:25569), en el que se ha reconstruido la conocida colonia infantil de campamentos de verano Venero Claro, por la que anualmente pasa más de medio millar de niños y jóvenes. Además de las instalaciones (edificios, pistas polideportivas, piscina, granja…), se reconstruye el arroyo Cabrera, que tiene frecuentes y virulentos eventos de avenidas torrenciales y flujos de derrubios (Fig. 6). Los jóvenes, además de recorrer las instalaciones, ante una riada tienen que saber cómo actuar y qué medidas de autoprotección adoptar, como huir a las zonas elevadas, no acercarse a la zona inundada (donde 'morirían ahogados') o los teléfonos de emergencia.

Además de los dos servidores y mundos, disponibles para juego en las plataformas de ordenador personal (Windows, Mac, Linux), se han abierto un canal en YouTube llamado '*Minecraft Gea*' y una cuenta en la red social *Instagram*, en los que se cuelgan vídeos breves de recorridos y funcionamiento del juego. Próximamente se emplearán las capacidades de incorporación de MDE mediante conexiones con los SIG y también las funcionalidades de la realidad virtual con *Minecraft Earth*.
Con todo ello se pretende lograr poner a disposición de los jóvenes, con sus herramientas y hábitos, el apasionante mundo de los riesgos naturales. Ya ha sido empleado en una edición de las actividades en Venero Claro-Agua (2019), con notable éxito de acogida y seguimiento por los participantes.

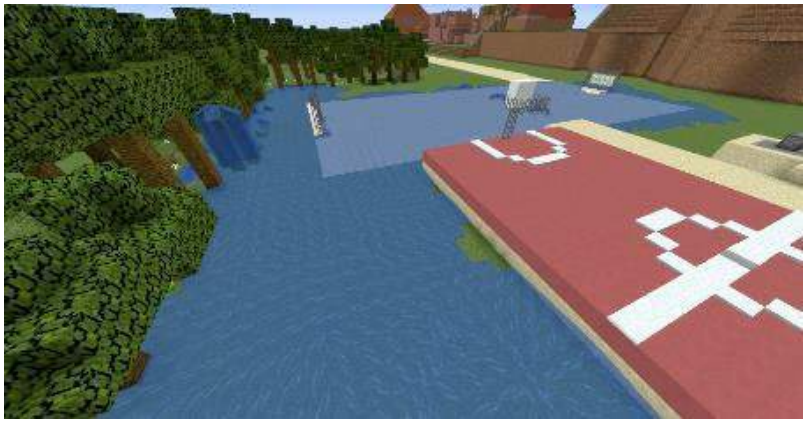


Figura 6. Imagen del videojuego *Minecraft*, mundo Venero Claro, en la que el arroyo Cabrera desbordado inunda las canchas de baloncesto y el campo de fútbol de la Colonia infantil.

4. DISCUSIÓN Y VALORACIÓN

Como ha quedado patente en los anteriores apartados, el principal valor y carácter innovador de este proyecto educativo en torno riesgo de inundación, reside en diferentes aspectos:

- **Originalidad**: se trata del único proyecto educativo que se realiza en esta temática, dirigido a jóvenes, en España, y posiblemente en Europa (al menos del que se tenga conocimiento en la literatura especializada). Máxime utilizando desde actividades clásicas (charlas, talleres, juegos) a métodos innovadores (videojuegos).
- **Persistencia**: se trata de un proyecto mantenido en el tiempo (por ahora a lo largo de siete años), y no una actuación puntual ligada a una única actividad.
- **Alcance**: se han visto implicados más de 3.700 jóvenes y por extensión sus familiares y amigos (estimados en más de 15.000 personas), puesto que las actividades y la concienciación ambiental que de ellas derivan, son aplicables al ámbito escolar y sus lugares de residencia.
- **Rigurosidad**: todas las actividades están programadas, dirigidas y ejecutadas por profesionales y especialistas, tanto de los riesgos ligados al agua (inundaciones y sequías), como de la educación en tiempo libre.
- **Sostenibilidad**: todas las actividades fomentan valores relacionados con actuaciones humanas sostenibles con el medio natural, tanto en el tiempo como en el espacio.
- **Calidad**: el programa ha sido incluido en las propuestas de proyectos enviadas al Plan Nacional de I+D+i que lo ha financiado; y se somete a las evaluaciones de los propios jóvenes participantes mediante encuestas de satisfacción.
- **Difusión**: el programa educativo ha sido presentado en Internet, redes sociales y en diferentes congresos y reuniones técnicas por su originalidad, la última de ellas el congreso que la *Society for Risk Analysis- Iberian Chapter* celebrará en Toledo, los días 6 y 7 de septiembre de 2018 (Díez-Herrero *et al.*, 2018; Hernández-Ruiz *et al.*, 2018).
- **Repercusión mediática:** en prensa, radio, televisión y medios digitales, sobre todo a raíz de los premios recibidos de la Fundación Botín y en el concurso de Ciencia en Acción 2019 (Díez-Herrero et al., 2019b).

Esto lo hace diferente y distintivo respecto a otras iniciativas de formación en el riesgo, como las actividades formales en educación superior y másteres, las actividades dirigidas a gestores, administradores y colectivos implicados ('escuelas de alcaldes'; 'formación de agricultores'); o a las charlas y conferencias convencionales dirigidas a público adulto, muchas veces convencido y que no precisan esos conocimientos y actitudes ante el riesgo de inundaciones.

5. CONCLUSIONES

El programa de educación en el riesgo de inundaciones a población infantil de Venero Claro-Agua es pionero en el tiempo y su mantenimiento en nuestro país, e innovador en las estrategias formativas, desde los clásicos talleres prácticos al uso de videojuegos. Con esta iniciativa se ha conseguido incrementar significativamente el conocimiento y percepción del riesgo de inundaciones de varios millares de niños y niñas, y por extensión de sus familiares y conocidos, mejorando su resiliencia y capacidades de autoprotección ante posibles desastres a las que se tengan que enfrentar en el futuro. Además, este conocimiento es mantenido tras los años y dejará poso en su forma de actuar y enfrentarse a las inundaciones. Sería deseable que estas experiencias piloto se hicieran extensivas al conjunto de la población, con las necesarias adaptaciones, para mejorar la preparación ante futuros desastres y la mitigación de los riesgos, tal y como recoge el objetivo 1 de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer su colaboración a la Fundación Ávila, el Colegio Jesús María, Bankia y cuantas instituciones y personas hacen posible todos los años los campamentos infantiles de Venero Claro. Especialmente a Mario, Carmen y Mariano, y los coordinadores y monitores de los campamentos, que siempre han colaborado con nuestras investigaciones y actividades. También al Ayuntamiento de Navaluenga por su colaboración y apoyo; y a los agentes medioambientales e ingenieros de la Junta de Castilla y León, especialmente a 'los José Luises'. A la Fundación Botín, que a través de la dotación económica del 'Premio al talento joven a la gestión sostenible del agua' (edición 2018, modalidad proyecto educativo), ha permitido la adquisición del equipo informático, la apertura de una cuenta *Minecraft Premium* para la creación del 'mundo' Venero Claro y el alquiler del servidor informático durante un tiempo.

Esta estrategia ha sido financiada por los proyectos de investigación, que se han sucedido en el tiempo a lo largo de la última década y media: Plan Nacional de I+D+i (RiskGredos, Dendro-Avenidas, MAS Dendro-Avenidas, MARCoNI, DRAINAGE); o financiados por organismo públicos de investigación (GeoRiada y MIDHATO Venero). En los últimos años forma parte, como estrategia de divulgación (GT5.T3), del proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE).

REFERENCIAS

- Díez Herrero, A. (2008). Taller: ¡Doctor, doctor... que se me inunda la casa! *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.1, 35-42.
- Díez Herrero, A., Llorente, M., Ballesteros, J.A. y Ruiz, V. (2009). Riesgos por avenidas e inundaciones fluviales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.3 (Monográfico: Riesgos geológicos externos), 254-263.
- Díez Herrero, A., Lain Huerta, L. y Llorente Isidro, M. (2010). Discovering flash floods with Piqueto (Piqueto y las avenidas torrenciales). En: R.M. Ros Ferré (Ed.), *Ciencia en Acción 11. Libro de Actas XI edición del concurso Ciencia en Acción*, pág. 214. Santiago de Compostela, 1 a 3 de octubre de 2010. CSIC, Ciencia Viva, RSEF, SGE, UNED.
- Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M., Ruiz-Villanueva, V., Gutiérrez-Pérez, I. y Ballesteros, J.A. (2012). La cuenca piloto de Venero Claro y su nueva web de distribución pública de datos hidrometeorológicos. *Geo-Temas*, 13, 430 (1-4). VIII Congreso Geológico de España, Oviedo 17-19 de julio de 2012. Sociedad Geológica de España y Universidad de Oviedo.
- Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M., Ruiz-Villanueva, V., Ballesteros, J.A., Pardo Iguzquiza, E., Guardiola-Albert, C., Lain, L., Pérez-Cerdán, F., Mancebo, M.J., Lozano, M.E., Llorente, M., Perucha, M.A., Hernández, M., Tapiador, F.J., Fernández, J.A., De Salas, L., Gallart, F., Olivera, F., Garrote, J. y Rivero, C. (2014). La cuenca piloto instrumentada de Venero Claro y la plataforma de distribución pública de datos hidrológicos. En: S. Schnabel y Á. Gómez Gutiérrez (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, 52-55, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Universidad de Extremadura y Sociedad Española de Geomorfología, Cáceres.
- Díez-Herrero, A., Carrera, C., Hernández-Ruiz, M. y Bodoque, J.M. (2018). Improving children's resilience to flood risk through nonformal education in summer camp activities: six years of experience in Venero Claro (Spain). In: M. Amérigo, J.A. García, R. Gaspar y S. Luís (Eds.), *Proceedings of the SRA-E-Iberian Chapter (SRA-E-I) Conference. "Interdisciplinarity in practice and in research on society and the environment: Joint paths towards risk analysis"*, 58-59. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Colección Jornadas y Congresos nº 20, Toledo. http://doi.org/10.18239/jor_20.2019.01 (edición electrónica).
- Díez-Herrero, A., Díez Marcelo, P., Vegas, J. y Cabrera, A. (2019a). 'Gamificación' para la geoconservación mediante Minecraft. En: Esther Martín-González, Juan J. Coello Bravo y Juana Vegas Salamanca (Eds.), *El patrimonio geológico: una nueva visión de la Tierra*. Serie:

Cuadernos del Museo Geominero, Nº 30, 235-240. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

- Díez Herrero, A., Díez Marcelo, P., Vegas Salamanca, J., Hernández Ruiz, M. y Cabrera Ferrero, A. (2019b). VideoGEOs. Practicando Geología usando el videojuego Minecraft. VideoGEOs. Practicing Geology using Minecraft video game. En: R.M. Ros Ferré (Ed.). *Ciencia en Acción 20. Libro de Actas*, pág. 156. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Fundació Princesa de Girona, Fundación Lilly, Instituto de Ciencias Matemáticas, Real Sociedad Española de Física, Real Sociedad Española de Química, Sociedad Española de Astronomía, Sociedad Geológica de España, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Albedo Fulldome, S.L., Alcoi (Alacant).
- Laín, L., Díez-Herrero, A. y Llorente, M. (2009). *Piqueto y las Avenidas Torrenciales*. Videograbación de 20'31" de duración, en idioma castellano, formato PAL 4:3, DVD. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

MEJORA DE LA PERCEPCIÓN Y CONOCIMIENTO INFANTIL SOBRE EL RIESGO DE INUNDACIONES: PROGRAMA 'VENERO CLARO-AGUA' (ÁVILA)

Mario Hernández Ruiz
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
m.hernandez@igme.es
https://orcid.org/0000-0002-4088-2269

Miguel García-Pozuelo Ben
Gerencia de Planificación y Gestión Hídrica. TRAGSATEC, España
mgarciap@tragsa.es

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

Carlos Carrera Torres
Fundación Ávila, España
carloscarrera@fundacionavila.es

RESUMEN

El proyecto de educación no formal 'Venero Claro-Agua' es un conjunto de actuaciones dirigidas a niños y preadolescentes, orientado a concienciar a la población infantil de la importancia de la prevención de los desastres naturales, y en particular del riesgo por avenidas e inundaciones. A lo largo de las siete ediciones anuales de la actividad celebradas (2013-2019) han pasado por los campamentos infantiles de veraneo en Navaluenga (Ávila) y han participado en este programa educativo más de 3.700 jóvenes (unos 540 por edición anual) de diferentes procedencias geográficas de toda España. La evaluación realizada mediante encuestas pre-actividad y post-actividad en el año 2018 a medio millar de participantes, ha demostrado la eficacia del programa en el aumento del conocimiento y la percepción frente al riesgo de inundaciones; no sólo porque se produce un incremento en los valores entre antes (pre-) y después (post-) de haber participado en las actividades formativas; sino porque el conocimiento y percepción se mantiene en el tiempo, entre un año y otro, como lo demuestra la mejora de valores cuando se ha participado en la actividad en años previos.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de la trascendencia socioeconómica de las inundaciones, la concienciación de la población en general sobre las disciplinas ocupadas de su estudio, las medidas para su mitigación y de las prácticas de autoprotección es muy limitada, y en muchos aspectos inexistente. Particularmente grave es la situación en el caso de la población infantil (niños y adolescentes) que, junto con las mujeres, son las principales víctimas en desastres por inundaciones. Tampoco es más esperanzadora la formación científica en estas materias que reciben los jóvenes en edad escolar (Enseñanza Infantil, Enseñanza Primaria y Enseñanza Secundaria), por no estar adecuadamente desarrolladas en los

curricula de asignaturas como Conocimiento del Medio, Ciencias de la Naturaleza o Biología y Geología; que se limitan a tratar aspectos generales del ciclo del agua o del funcionamiento básico de los ríos (ver temarios de los cursos de 3º EPO a 1º ESO). Por todo lo anteriormente expuesto, es necesario incrementar la concienciación relacionada con las disciplinas que abordan el análisis y prevención del riesgo por avenidas e inundaciones; y no sólo por objetivos académicos, sino por motivos prácticos que entroncan con la seguridad personal.

Por otro lado, los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) promovidos por las demarcaciones hidrográficas en cumplimiento de la Directiva europea de gestión del riesgo de inundaciones 60/2007, contemplan como primer y fundamental objetivo el aumento de la percepción del riesgo por parte de la población; aunque las medidas dedicadas a ello muchas veces se limiten a simples charlas informativas y no incluyan presupuesto para actuaciones específicas para los diferentes colectivos de la sociedad.

La actuación denominada 'Venero Claro-Agua' ha consistido en anteriores ediciones (2013-2019) en un programa de actividades formativas en materia de Ciencias de la Tierra (fundamentalmente Geología, Meteorología e Hidrología) enfocadas a la educación en el riesgo de inundaciones (Díez-Herrero *et al.*, 2018). El objetivo de este estudio es evaluar la efectividad de este programa educativo no formal en la mejora de la percepción y el conocimiento sobre el riesgo de inundación por parte de la población infantil participante.

2. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD EN LA MEJORA DE LA PERCEPCIÓN Y CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE INUNDACIONES (2018)

A la vista de la gran repercusión socio-económica de las inundaciones, la trascendencia de la multidisciplinaridad científica que requiere su estudio, la limitación de la concienciación de la población sobre la importancia del estudio y la prevención de las mismas, la necesidad de aumentar el conocimiento y la percepción poblacional de estos riesgos así como su gestión (predicción, prevención, gestión de la emergencia y recuperación posterior), el diseño de acciones educativas para la población infantil y adolescente que son la cantera de futuros ocupantes, gestores y, lo más duro , probables damnificados por las inundaciones en las zonas susceptibles a ellas, sólo nos queda, en principio, la cuantificación de la eficiencia de dichas acciones educativas.

En la edición de 2018 de las actividades de Venero Claro-Agua, un equipo de psicólogos ambientales del IGME y de las Universidades de Valladolid, Castilla-La Mancha y Complutense de Madrid, analizaron la efectividad de las actuaciones formativas mediante encuestas de conocimiento y percepción, tanto previas a las actividades, como posteriores a las mismas (Hernández-Ruiz *et al.*, 2018).

La encuesta constó de una serie de preguntas que se dividían en distintos apartados. Un primer apartado (bloque 0) diseñado para la caracterización demográfica de los encuestados; un segundo apartado (bloques 1 y 2) en el que las preguntas se enfocan en cuantificar el conocimiento de los niños acerca de la temática de las acciones educativas; y un último apartado (bloque 3) en el que se ha utilizado el método de Likert (Fig.1), con preguntas enfocadas a la percepción relativa del riesgo de inundación.

Dicho año asistieron al campamento un total de 540 niños de los cuales 180 pertenecían al colegio Jesús María de Madrid y los 360 restantes procedían de distintos centros (hijos de empleados o clientes de Bankia).

Del total de 540 encuestas realizadas previamente y posteriormente a las acciones formativas (pre- y post-), entregadas a los monitores del campamento para gestionar su cumplimentación por los niños (Fig.2), el estudio de análisis de las respuestas se ha realizado con 297 formularios rellenos; ya que el resto de las encuestas, o bien no fueron rellenadas, o bien presentaban errores que impedía un correcto análisis.

Una vez recopilados los resultados de las encuestas, se han obtenido gráficos que ilustran los resultados mediante el *software Microsoft Excel*; y se han realizado una serie de análisis estadísticos con el *software SPSS*. Los primeros análisis que se han llevado a cabo han consistido en comparar la puntuación media obtenida tanto en el test de conocimiento como en el de percepción, en la encuesta pre-actividad y en la encuesta post-actividad (Figs.3 y 4). De esta manera se comprueba la eficacia de las charlas y actividades llevadas a cabo con los alumnos como herramientas para mejorar la percepción y el conocimiento que poseen sobre las inundaciones.

Para comprobar si estos resultados son estadísticamente significativos se ha llevado a cabo una prueba *T* de Student para muestras relacionadas, de la que se han obtenido los resultados contenidos en la Tabla 1.



Figura 1. Página de la encuesta correspondiente al bloque 3 de preguntas relativas a la percepción del riesgo de inundación, en formato Likert.



Figura 2. Taller de formación a los monitores por parte de los psicólogos ambientales, para el paso de la encuesta a los campistas.



Figura 3. Puntuación media obtenida en el test de conocimiento pre- y post-actividad formativa.



Figura 4. Puntuación media obtenida en el test de percepción pre y post-post actividad formativa

Par TOTAL_C_PRE 1 TOTAL_C_POS	Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación típica	Error típ. media	95% Intervalo confianza diferencia				
				Inferior	Superior			
Test de conocimiento	-1.593	1.894	0.110	-1.809	-1.376	-14.49	296	0.000
Test de percepción	-5.054	6.099	0.354	-5.750	-4.357	-14.28	296	0.000

Tabla 1. Resultados de la Prueba *T* de Student para la prueba de muestras relacionadas de los test de conocimiento y percepción.

Como se puede observar en la Tabla 1, ambos test presentan resultados significativos (Sig<0,05), por lo que confirman que la percepción de los encuestados aumenta tras haber asistido a la charla y actividades impartidas en el campamento.

A continuación, se llevaron a cabo unos análisis que consistieron en comprobar la eficacia de estas actividades a lo largo de los años, teniendo en cuenta exclusivamente los resultados de la encuesta pre-actividad, de manera que se pueda ver hasta qué punto los niños que han asistido al campamento, y por ende a estas charlas, durante varios años retienen este conocimiento así como la percepción y siguen una proyección ascendente. Para realizar estos análisis se han tenido en cuenta tanto el test de conocimiento-pre como con el test de percepción-pre para comparar los resultados de los encuestados que asisten por primera vez al campamento con los que han asistido más veces. Al realizar una comparación de medias se puede apreciar que tanto los resultados obtenidos en el test de de conocimientos como en el de percepción siguen una proyección ascendente (Figs.5 y 6).



Figura 5. Puntuación media obtenida en el test de conocimiento pre-, en función del número de visitas o participaciones previas en el campamento años anteriores.



Figura 6. Puntuación media obtenida en el test de percepción pre-, en función del número de visitas o participaciones previas en el campamento años anteriores.

Para comprobar que estos resultados presentan una mejora estadísticamente significativa en función del número de visitas se ha realizado un análisis ANOVA, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

TEST	GRUPOS	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Conocimiento	Inter-grupos	158.413	3	52.804	17.275	0.000
	Intragrupos	895.587	293	3.057		
	Total	1054.000	296			
Percepción	Inter-grupos	530.056	3	176.685	6.949	0.000
	Intragrupos	7449.890	293	25.426		
	Total	7979.46	296			

Tabla 2. Resultados del análisis ANOVA de un factor para el test previos (pre-) de conocimiento y percepción pre- en función del número de visitas o participaciones previas en el campamento años anteriores.

En ambos test, el nivel de significación (Sig.) es menor que 0,05; es decir, la mejora en el resultado de los test en función del número de visitas es significativa.

Estos resultados muestran cómo el número de veces que los encuestados han acudido al campamento, con sus correspondientes charlas de educación en el riesgo, influye notablemente en la percepción y conocimiento que éstos conservan.

Otro de los análisis que se ha realizado ha consistido en estudiar la posible relación que pueda

presentar la edad de los niños con la percepción que éstos presentan. Para ello se han utilizado los resultados obtenidos en los test de conocimientos y percepción pre- y se han comparado con la edad de los encuestados obteniendo los resultados que muestran las Figs.7 y 8.

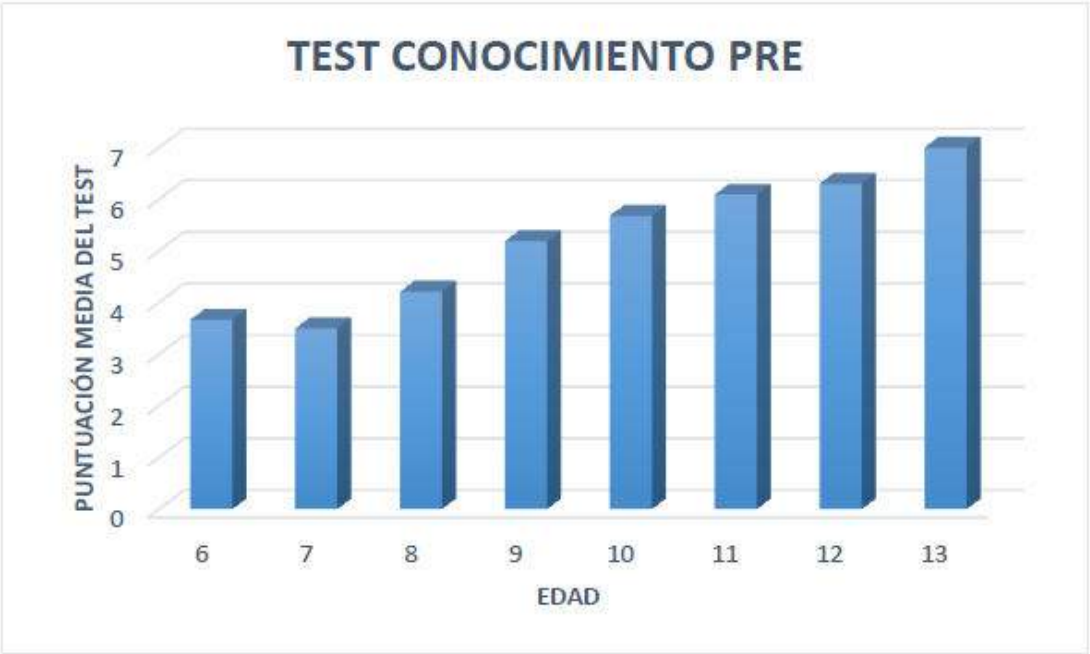


Figura 7. Puntuación media obtenida en el test de conocimiento pre- en función de la edad.

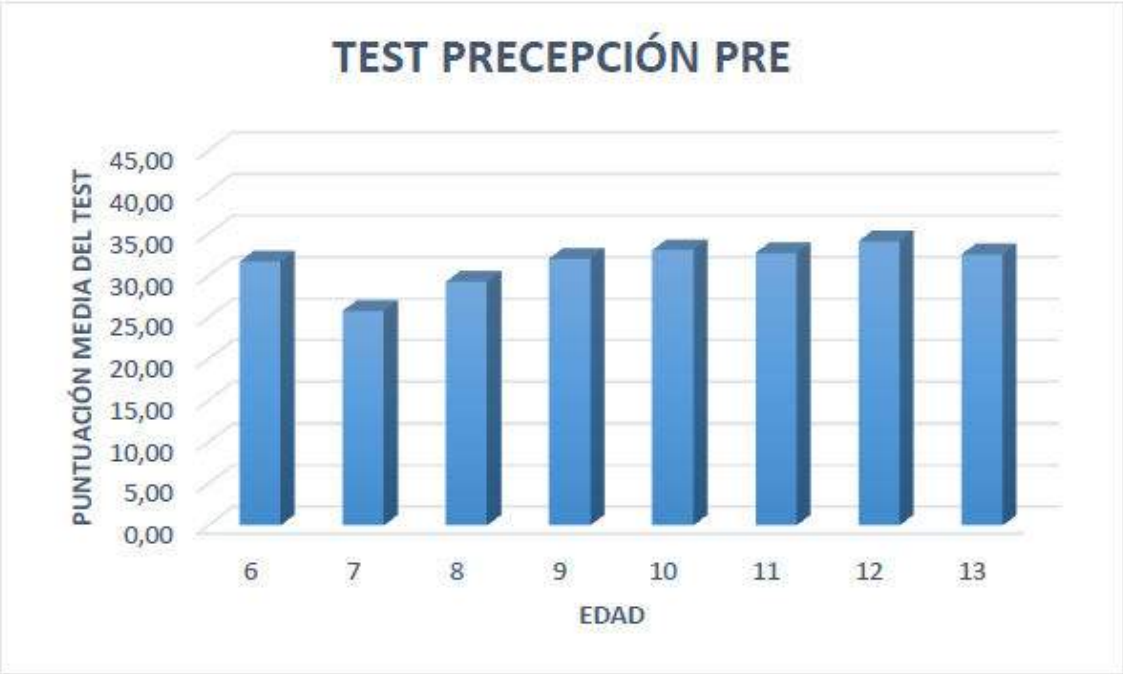


Figura 8. Puntuación media obtenida en el test de percepción pre- en función de la edad.

De la misma manera que en el caso anterior, se han realizado los análisis ANOVA correspondientes para determinar si el aumento de conocimiento y percepción con la edad es significativo (Tabla 3).

TEST	GRUPOS	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Conocimiento	Inter-grupos	165.563	7	23.652	7.694	.000
	Intragrupos	888.437	289	3.074		
	Total	1054.000	296			
Percepción	Inter-grupos	723.946	7	103.421	4.119	.000
	Intragrupos	7256.000	289	25.107		
	Total	7979.946	296			

Tabla 3. Resultados análisis ANOVA de un factor para los test previos (pre-) de conocimiento y percepción en función de la edad.

En ambos casos la relación vuelve a ser significativa (Sig. < 0,05). Sin embargo, si observamos los resultados del incremento en la media de aciertos en función de la edad (Figs.9 y 10), tanto en conocimiento cómo en percepción, vemos que esta mejora disminuye cuando los niños empiezan a llegar a la edad pre-adolescente.

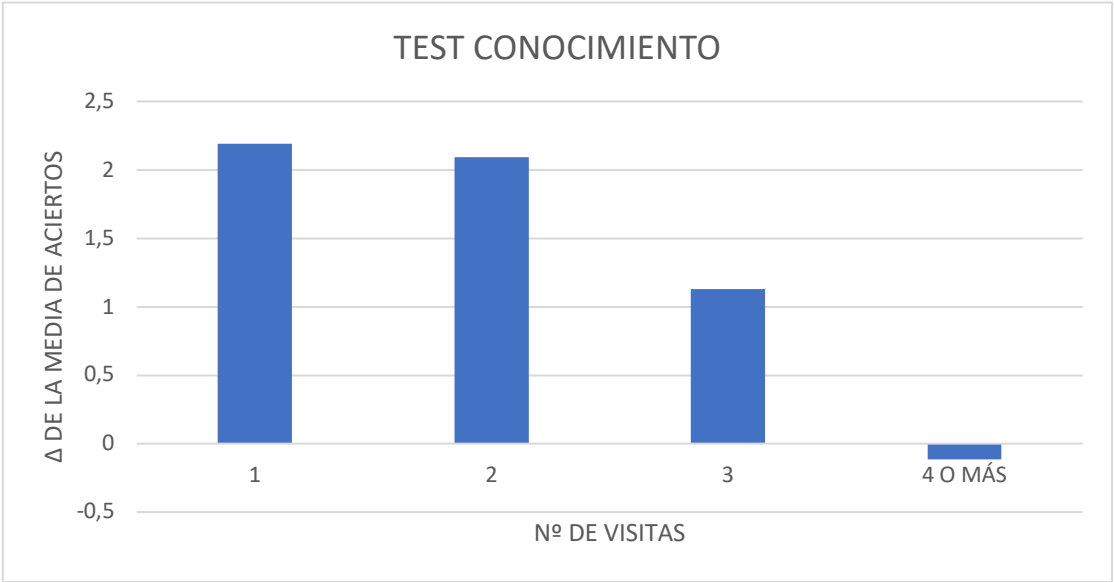


Figura 9. Incrementos de la media de aciertos en el test de conocimiento en función del número de visitas (indirectamente dependiente de la edad).

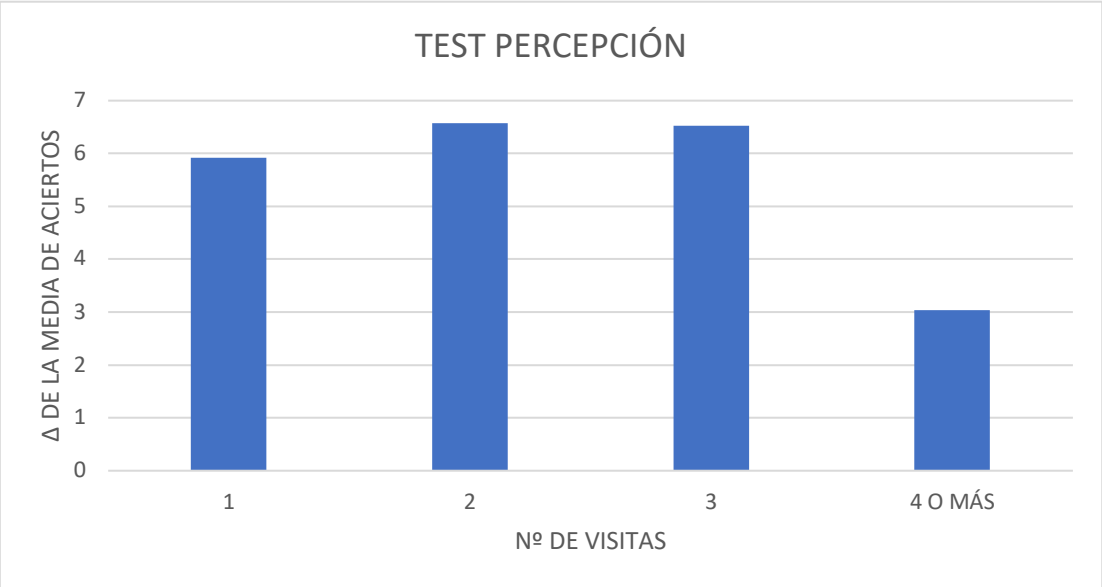


Figura 10. Incrementos de la media de aciertos en el test de percepción en función del número de visitas (indirectamente dependiente de la edad).

Este efecto podría deberse tanto al cambio psicofisiológico propio de la edad que les lleva a dirigir su atención en otras direcciones como a que este tipo de charlas informales-juegos ya no les estimula tanto. Es por ello que se planteó por parte del equipo la búsqueda de otra manera de captar la atención de esta población adolescente a través de nuevas iniciativas de educación y comunicación en el riesgo de inundaciones.

3. CONCLUSIONES

El programa de educación en el riesgo de inundaciones a población infantil de Venero Claro-Agua es pionero en el tiempo y su mantenimiento en nuestro país, e innovador en las estrategias formativas, desde los clásicos talleres prácticos al uso de videojuegos. Con esta iniciativa se ha conseguido incrementar significativamente el conocimiento y percepción del riesgo de inundaciones de varios millares de niños y niñas, y por extensión de sus familiares y conocidos, mejorando su resiliencia y capacidades de autoprotección ante posibles desastres a las que se tengan que enfrentar en el futuro. Además, este conocimiento es mantenido tras los años y dejará poso en su forma de actuar y enfrentarse a las inundaciones. Sería deseable que estas experiencias piloto se hicieran extensivas al conjunto de la población, con las necesarias adaptaciones, para mejorar la preparación ante futuros desastres y la mitigación de los riesgos, tal y como recoge el objetivo 1 de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundaciones.

Se espera que estos esfuerzos retornen a la sociedad del modo en que más perduran, en la educación de los futuros habitantes y gestores de las zonas potencialmente inundables, partiendo de la premisa de que si estos proto-gestores son conscientes del riesgo desde su infancia estarán en un futuro concienciados y preparados para minimizarlo en todos los factores de la ecuación del riesgo (= peligrosidad x vulnerabilidad x exposición).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer su colaboración a la Fundación Ávila, el Colegio Jesús María, Bankia y cuantas instituciones y personas hacen posible todos los años los campamentos infantiles de Venero

Claro. Especialmente a Mario, Carmen y Mariano, y los coordinadores y monitores de los campamentos, que siempre han colaborado con nuestras investigaciones y actividades. Agradecimiento extensivo al equipo de psicólogas ambientales del proyecto DRAINAGE, por su colaboración en los aspectos ambientales de las encuestas (pendientes de análisis e interpretación). A la Fundación Botín, que a través de la dotación económica del 'Premio al talento joven a la gestión sostenible del agua' (edición 2018, modalidad proyecto educativo).

Este estudio forma parte, como estrategia de comunicación (GT5.T3) y análisis de la percepción (GT5.T2 y GT5.T4), del proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE).

REFERENCIAS

- Díez-Herrero, A., Carrera, C., Hernández-Ruiz, M. y Bodoque, J.M. (2018). Improving children's resilience to flood risk through nonformal education in summer camp activities: six years of experience in Venero Claro (Spain). In: M. Amérigo, J.A. García, R. Gaspar y S. Luís (Eds.), *Proceedings of the SRA-E-Iberian Chapter (SRA-E-I) Conference. "Interdisciplinarity in practice and in research on society and the environment: Joint paths towards risk analysis"*, 58-59. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Colección Jornadas y Congresos nº 20, Toledo. http://doi.org/10.18239/jor_20.2019.01 (edición electrónica).
- Hernández-Ruiz, M., García-Pozuelo, M., Díez-Herrero, A., Poggio, L., Pérez-López, R., Amérigo, M. y Bodoque, J.M. (2018). Assessing flood risk perception for the education of risk activities at the Venero Claro children's camp (Central Spain). In: M. Amérigo, J.A. García, R. Gaspar y S. Luís (Eds.), *Proceedings of the SRA-E-Iberian Chapter (SRA-E-I) Conference. "Interdisciplinarity in practice and in research on society and the environment: Joint paths towards risk analysis"*, 56-57. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Colección Jornadas y Congresos nº 20, Toledo. http://doi.org/10.18239/jor_20.2019.01 (edición electrónica).

PRIMERA APROXIMACIÓN AL REGISTRO DE AVENIDAS E INUNDACIONES HISTÓRICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

RESUMEN

Los catálogos de inundaciones históricas son muy importantes tanto en la caracterización de la frecuencia y magnitud de las avenidas del pasado, como en la mejora de la estimación de la inundabilidad futura, sus repercusiones en elementos expuestos (población, bienes y servicios) y la eficacia de las medidas de mitigación implantadas. A partir de la consulta de archivos, bibliotecas y hemerotecas y del trabajo de campo (observación de evidencias y entrevistas) en las últimas tres décadas, se ha realizado una recopilación de eventos de inundación en diversas localidades de la provincia de Segovia, pero especialmente en su capital, la ciudad de Segovia, correspondientes al intervalo entre los años 1202 y 2019. El más de medio centenar de inundaciones históricas documentadas y caracterizadas, en ocasiones reconstruidas con estimación de caudales (con modelos hidrológicos e hidráulicos) y frecuencias de ocurrencia (con datación dendrocronológica), supone una mejora sustancial respecto a catálogos previos, y puede servir para completarlos y ser incorporadas en futuras evaluaciones preliminares del riesgo de inundación o las cartografías oficiales de peligrosidad y riesgo.

1. INTRODUCCIÓN

En la provincia de Segovia se han producido históricamente, tienen lugar en la actualidad y pueden desarrollarse en el futuro, prácticamente todos los tipos de inundaciones de interior (no costeras ni litorales marinas) que se diferencian en las clasificaciones comunes utilizadas en protección civil:

- Inundaciones por precipitación *in situ* (encharcamiento), cuando la cantidad o intensidad de precipitación líquida, o la fusión de las precipitaciones sólidas (nieve o granizo), supera la capacidad de infiltración del suelo, por ser éste impermeable o por elevación de la superficie freática. Así ha ocurrido en localidades de las campiñas, los llanos y la Tierra de Pinares.
- Inundaciones por desbordamiento de corrientes fluviales, tanto de los principales ríos de la provincia, como de los múltiples arroyos, barrancos y caceras.
- Inundaciones por la rotura o inadecuada operación de infraestructuras hidráulicas, como presas de embalse, azudes, canalizaciones, acueductos, balsas, etc.

Por sus características hidrológicas (tiempo base del hidrograma, otros tiempos característicos, relación caudal punta-caudal medio, etc.), los eventos extremos de aumento de caudales en los arroyos y ríos segovianos pueden ser tanto crecidas como avenidas súbitas. Las crecidas (del latín *crescere*, 'aumentar lenta y progresivamente') se producen en eventos de precipitaciones prolongadas, normalmente asociadas al paso sucesivo de frentes atlánticos de procedencia occidental o suroccidental, tanto de lluvias copiosas acumuladas, como de la fusión de nieve; como ocurrió en las crecidas en los principales ríos (Eresma, Cega, Duratón y Riaza) en los años 1956, 1989, 1996 y 2014,

por poner algunos ejemplos. Las avenidas (del latín *advenire*, 'venir hacia ha posición del observador') se producen tanto asociadas a precipitaciones prolongadas como por precipitaciones intensas y concentradas, cuando adquieren carácter torrencial por sus cortos tiempos característicos (súbitas) y sus caudales punta extraordinarios, como ocurrió con las avenidas de los torrentes de la Sierra (Real Sitio de San Ildefonso) y en los arroyos y barrancos de las campiñas y llanos (Martín Miguel).

2. LAS INUNDACIONES HISTÓRICAS EN LA CIUDAD DE SEGOVIA Y SU ENTORNO

El registro de inundaciones históricas de la ciudad de Segovia es relativamente reducido para lo que cabría esperar en una ciudad con más de dos milenios de historia, y con la trascendencia socio-política que ha tenido desde la dominación romana. Los motivos fundamentales de este reducido registro de inundaciones pretéritas derivan del hecho de que el recinto amurallado y gran parte del caserío se encontraba elevado varias decenas de metros respecto al fondo de los valles circundantes (Eresma y Clamores), por lo que las noticias sobre los efectos de las inundaciones están restringidos a las fincas y construcciones del fondo de los valles (monasterios, conventos, molinos, puentes...), o a los arrabales de la ciudad ubicados en las orillas de los ríos (San Lorenzo, San Marcos, Santa Eulalia, San Millán...). Sin embargo, los edificios emblemáticos y centros del poder civil, militar o religioso (Alcázar, Catedral, Ayuntamiento, Palacio Obispal...), por su situación en lo alto del recinto amurallado, salvo la Real Casa de la Moneda, nunca se han visto afectados por las inundaciones, y por ello se pierden importantes y continuas series documentales de registro.

2.1. Inundaciones históricas del río Eresma en la ciudad de Segovia

A partir de la consulta de diferentes fuentes de archivos, bibliotecas y hemerotecas, ha sido posible ir completando una relación de los principales eventos de inundación que han afectado al valle del río Eresma a su paso por la ciudad de Segovia (ver referencias bibliográficas completas en Díez Herrero *et al.,* 2007-2018 y 2020):

- 01-1202, Inundaciones generalizadas en los ríos segovianos *"... cayendo el 30 de diciembre* [de 1201] *una terrible nevada que, al fundirse pocos días después, produjo desastrosas inundaciones generales*".
- 1304. Inundación del Monasterio de Santa María de los Huertos, siendo abad Arnaldo, a causa del desbordamiento del río Eresma, que "*inundó la iglesia y claustros de él*".
- 13-05-1477. Inundación del Eresma de consecuencias desconocidas. IA, AMSg.
- 1502. El puente de la Alameda ha sido derribado por las crecidas. AGS, AMSg.
- 1504. El puente de la Alameda ha sido construido en madera dos veces, y ambas veces solo ha durado dos años, pues crecidas sucesivas lo han derribado. AGS.
- 26-01-1511. Peticiones sucesivas del Concejo de Segovia para arreglar el puente sobre el río Eresma a la altura del Monasterio del Parral, roto por las crecidas. AGS, RGS.
- Invierno 1513-1514. Solicitud de reparación del puente desde el Soto al Tormohito (Alameda del Parral) para permitir el paso de las carretas y los mercaderes. AGS.
- Otoño 1521. Inscripción de inundación en un libro de canto de la Catedral de Segovia. ARH.
- 25-08-1540. Avenida del Eresma que arrancó dos puentes, seis batanes, once molinos y más de cuarenta casas; inundó el monasterio de Sta. María de los Huertos, y alcanzó tres varas en la iglesia y las casas de San Lorenzo.
- 25-08-1543. Avenida del Eresma en Segovia de consecuencias catastróficas; también crecido en Carbonero el Mayor.
- 1547. Inundación del Eresma de consecuencias desconocidas. IA, AMSg.
- 1598. Las inundaciones obligan a los frailes del Monasterio de Sta. María de los Huertos a abandonar el mismo. AP.

- 1599. Inundaciones en el Monasterio de Sta. María de los Huertos. AP.
- 1603. El río arrastró el macho de acarreo en el molino de San Lázaro.
- 1605. Arreglo de lo derruido en la Puente Castellana por el cantero Yturralde. GMR.
- Invierno de 1618. Domingo de Mendiola. AGS.
- 1626. Reparación de la cerca principal del convento de San Vicente, derribada por las aguas. AH.
- Enero de 1627. Propuesta de reparación (22-2-1627) del batán que se había llevado el río. GMR.
- 31-10/01-11-1629. Monasterio de Sta. María de los Huertos. Escribano Eugenio Velázquez. AHPS.
- 1681. Daños en el puente de piedra del Monasterio de Santa María del Parral. GMR.
- 1695. Libros de Cuentas del Ayuntamiento 1696-1697. AMSg.
- 23-06-1733. Avenida súbita del Clamores y Eresma con consecuencias catastróficas en la ciudad de Segovia.
- 15-06-1734. Inundación en Segovia. "*Cayó tan copiosa lluvia el 15 de Junio de 1734, que se inundaron muchas casas del arrabal, y el agua subió hasta el altar mayor de la iglesia de los Capuchinos*"
- 22-06-1791. Expediente sobre reconocimiento de los Puentes de la Alameda, puente castellano y el de S. Lázaro con motivo de la avenida ocurrida el 22 de junio, AMSg.
- 19-03-1799. Se hacen los muros del parque del Alcázar, derribados por las avenidas del río Eresma el invierno anterior. AGP.
- 23 a 25-12-1860. La Casa de la Moneda de Segovia fue inundada tres veces.
- 15 y 16-05-1906. Daños en la planta hidroeléctrica segoviana. IA, AMSg.
- 29-03-1956. Se registra un caudal medio diario de 291 m^3/s (202 m^3/s en la revisión del Anuario). CHD, AS.
- 20-01-1966. Se registra un caudal instantáneo de 77 m^3/s. CHD, AS.
- 18-12-1997. Se registra un caudal instantáneo de 66 m^3/s. CHD, AS.
- 22 al 30-01-2009. Crecidas por precipitaciones intensas y prolongadas y fusión de nieve, con desbordamientos en Segovia que afectaron al Ingenio Chico de la Casa de la Moneda. CHD, AS.
- 26 al 30-03-2013. Crecidas por precipitaciones intensas y prolongadas y fusión de nieve, con desbordamientos en Segovia que afectaron al bar-restaurante del Ingenio Chico de la Casa de la Moneda y al taller de la herrería. CHD, AS.
- 01 al 03-03-2014. Crecidas por precipitaciones intensas y prolongadas y fusión de nieve, con desbordamientos en Segovia que afectaron al bar-restaurante del Ingenio Chico de la Casa de la Moneda. CHD, AS.

CLAVES: AGP, Archivo General de Palacio; AGS, Archivo General de Simancas; AHMS, Archivo Histórico Militar de Segovia; AHPS, Archivo Histórico Provincial de Segovia; AMSg, Archivo Municipal de Segovia; RGS, Registro General del Sello; AH, Archivo de Hacienda; AS, Adelantado de Segovia; CHD, Confederación Hidrográfica del Duero; IA, Isabel Álvarez (AMSg); ARH, Antonio Ruiz Hernando (RAHASQ); GMR, Guadalupe de Marcelo Rodao (PN).

2.2. Inundaciones históricas del arroyo Clamores en la ciudad de Segovia

Para el arroyo Clamores, a pesar de su modesto caudal y su variable régimen, se tiene constancia documental de numerosos eventos de avenidas históricas, muchas de ellas coincidentes en el tiempo con las de su vecino el río Eresma, y otras que en esta cuenca torrencial tuvieron un carácter mucho más catastrófico. Es el caso de la avenida de 1733, las acontecidas a mediados y finales del siglo XIX, la bien conocida inundación del verano de 1981, y las consecuencias de la última avenida súbita de agosto de 2019.

De la primera, se conserva el maravilloso y pormenorizado relato de Juan Antonio Marín (1733), trascrito en *Estudios Segovianos*, que da todo tipo de detalles sobre los efectos al paso de la avenida

por los distintos tramos de la ciudad. Incluso se han tratado de reconstruir los caudales circulantes a partir de modelos hidráulicos retrospectivos utilizando los niveles alcanzados en el puente de Valdevilla y a su paso por Santa Eulalia; y estimar la cuantía de la precipitación causante del evento mediante complejos modelos hidrometeorológicos de la cuenca.

El caudal punta estimado en el puente de Valdevilla, como consecuencia de la ocurrencia del evento de inundación de 23 de junio de 1733 fue de 40 m^3/s. Sin embargo, para el mismo evento el caudal punta determinado en el entorno de la iglesia de Santa Olalla fue de 135 m^3/s. La implementación del modelo hidrológico retrospectivo dio como resultado un hietograma de intensidad punta equivalente a 378 mm/hora (Fig.1).



Figura 1. Resultado del modelo hidráulico numérico para la reconstrucción de la dinámica de la riada de 1733 en un tramo del cauce del arroyo Clamores a su paso por la ciudad de Segovia. Fuente: José M. Bodoque, UCLM.

De la inundación producida por desbordamiento del Clamores el 5 de junio de 1853 se conserva un parte en el AMSg donde describe cómo las aguas bajaron con fuerza desde la Dehesa, desbordaron los puentes del Cañamón y Caño Grande e inundaron las casas de la calle de Cantarranas. El puente del Verdugo no pudo resistir el embate y se derrumbó; "*y las dos huertas tituladas del Juego de Pelota han quedado enteramente arrasadas en su parte más baja, pues donde no han abierto nuevos cauces la corriente, ha quedado cubierto con infinitos carros de escombro y arenas sobre las tablas de hortalizas*".

La inundación producida por el Clamores en la tormenta de agosto de 1981 fue profusamente recogida por la prensa local (*El Adelantado de Segovia*, 7 de agosto de 1981) y por infinidad de fotografías de época. Aunque causó numerosos daños y anegamientos, los mayores perjuicios se centraron en la actual plaza de Somorrostro (barrio de Santa Eulalia) y en la plaza del Doctor Gila (San Millán), donde varios vehículos entraron en flotación y se acumularon, chocando entre sí y contra los obstáculos. Entre las anécdotas más recordadas por la población local se encuentra que un puesto ambulante estacional de venta de melones y sandías, propiedad del conocido frutero Varela, fue anegado y los melones y sandías circulaban flotando arrastrados por la corriente, ante la admiración de los segovianos. También se recordará por la inundación abrió un boquete junto a una de las aulas prefabricadas, que entonces había en la zona conocida como polígono de San Millán.

En septiembre de 1999 las fuertes precipitaciones causaron inundaciones por desbordamiento del arroyo Clamores y su red de colectores, que afectaron sobre todo a puntos de los barrios de San Millán, San Marcos y San Lorenzo.

Por último, la avenida súbita de la tarde del 27 de agosto de 2019, aunque produjo algunos anegamientos locales en los mismos lugares que las anteriores (plazas de Somorrostro y Doctor Gila),

tuvo como principal consecuencia catastrófica el hundimiento decamétrico del firme en una plaza de San Millán, por entrada en carga y colapso de la conducción subterránea del arroyo Clamores, que enguyó dos vehículos estacionados encima. La reparación de este hundimiento, el reforzamiento de la cimentación del edificio próximo y la reconstrucción de la canalización subterránea en este tramo, han tenido un coste de varios centenares de miles de euros para el Ayuntamiento de Segovia.

2.3. Las inundaciones históricas en el monasterio de Sta. Mª de los Huertos

El antiguo Monasterio premostratense de Santa María de los Huertos se ubicaba en la llanura de inundación de la margen derecha del río Eresma a su paso por la Alameda del Parral, próximo a la denominada Huerta Grande. Este establecimiento religioso, ubicado allí desde la Baja Edad Media, sufrió reiteradamente los efectos de las inundaciones por efecto del desbordamiento del río, hasta el punto que condicionó el abandono definitivo de su ubicación original en el siglo XVII.

La inundación más antigua de la que se tiene noticia data del año 1304, siendo abad Arnaldo, a causa del desbordamiento del río Eresma, que "inundó la iglesia y claustros de él". Según la tradición, durante esta inundación se produjo el hecho milagroso de la llegada a la abadía de la imagen de Nuestra Señora de las Aguas, venerada desde entonces en la iglesia monasterial, depositada en la caja de marfil y plata en la que había llegado (actualmente propiedad de la Excma. Diputación Provincial de Segovia; Fig.2). Aunque esta circunstancia ha sido puesta en duda a través de estudios histórico-artísticos de la talla (Bartolomé y Sánchez, 1996).

> *"Ay un testimonio en papel blanco del dia i año en que llego a nuestro convento antiguo la Milagrosissima y prodigiosissima ymagen de nuestra señora de las aguas. Asi llamada por aver venido en el Rio Eresma en tiempo que creçio tanto que hentro en nuestro dicho convento una barra en alto sobre el altar maior, y esta santa ymagen vino sobre las aguas en una caja de marfil guarnecida de plata y a des horas de la noche, acompañada de una creçida antorcha que pasmaba quantos la miraban y sin hundirse siendo materia tan pesada la de la Santa ymagen y la caxa. Y de esta suerte se entro en nuestra yglesia y al bajar el rio se quedo sobre el ara del altar maior como diçe el testimonio que tiene su fecha en [blanco]..."*
>
> (Libro del Beçerro..., , fol. 7 vtº; Noriega, E. de, Dissertatio apologetica..., fol 138-139)

Tras la inundación del 25 de agosto de 1540, que alcanzó tres varas en la iglesia del Monasterio, quizás las inundaciones del monasterio mejor documentadas son las acontecidas a finales del siglo XVI e inicios del siglo XVII, agravadas por el recrecimiento del azud de la Real Casa de Moneda. La inundación de 1598 obligó a los frailes a abandonar el Monasterio; y al año siguiente (1599) se produce una nueva inundación. La de los primeros días de enero de 1627 debió de ser la más grave, ya que el nivel de las aguas se situó por encima de las gradas del altar mayor, teniendo los religiosos que ponerse a salvo saltando por la ventana. La detallada descripción que hizo el escribano de Segovia (D. Eugenio Velázquez) de la narración hecha por los monjes de la inundación de la víspera del Día de Difuntos del año 1629, contiene una pormenorizada relación de niveles de agua (“tres cuartas de vara”) y su evolución a lo largo de los días que duró el anegamiento.

Las excavaciones arqueológicas realizadas por el actual propietario de la finca a finales de los años 90, han permitido sacar a la luz el antiguo claustro e iglesia, y reconocer los arranques de los muros (Fig.3), con lo cual se podrán en un futuro próximo reconstruir los órdenes de magnitud de los caudales que produjeron dichas inundaciones, mediante modelaciones hidráulicas detalladas de esta zona.



Figura 2. Imagen de Nuestra Señora de las Aguas, procedente del monasterio de Nuestra Señora de los Huertos, actualmente en el Museo del Palacio Episcopal de Segovia.



Figura 3. Ruinas excavadas del monasterio de Nuestra Señora de los Huertos, con indicación de los niveles alcanzados por las avenidas históricas del Eresma que inundaron reiteradamente el mismo.

La frecuencia de inundaciones en el Monasterio era tal que los monjes, hartos de sufrir repetidamente las consecuencias de las inundaciones, decidieron solicitar al Concejo de la Ciudad la cesión de unos nuevos terrenos, para ubicar el nuevo convento en una zona alejada del río y sus inundaciones. Así, en el siglo XVII se fundó un nuevo convento con el mismo nombre (Santa María de los Huertos), primero en las inmediaciones de Santa Eulalia, y luego en la parte más alta de la ciudad, próximo al torreón de Arias Dávila. Las desamortizaciones del siglo XIX y las reformas en el urbanismo de la Ciudad hicieron que posteriormente fuera demolido, dando lugar a la conocida Plaza de los Huertos de Segovia.

2.4. Las inundaciones históricas en la Real Casa de Moneda de Segovia

A finales del siglo XVI, a propuesta del rey Felipe II, se decide construir una nueva casa de acuñamiento de moneda en Segovia, esta vez ubicada en las proximidades del río Eresma para aprovechar la fuerza motriz de su caudal. Se decide aprovechar parte de las instalaciones de un antiguo molino de papel y harina ubicado frente al Monasterio del Parral. El Nuevo Real Ingenio de la Moneda de Segovia (1583) era propiedad particular del Rey, gobernado por Real Junta de Obras y Bosques –administración interna de la Casa Real- y siempre acuñó con técnicas mecanizadas, nunca a martillo.

Desde que se inició su construcción, y durante todo el periodo en el que se estuvo acuñando moneda, las interferencias de la actividad fabril con las periódicas avenidas del río fue continua, hasta el punto de detener e interrumpir buena parte de las actividades del Real Ingenio. Por ello se conserva una buena y completa relación de eventos de crecida y avenida del río que tuvieron incidencia en la acuñación, y cuya información se encuentra en el Archivo Histórico de Simancas. Esta relación de

dependencia del río, no sólo para aprovechar su energía hidráulica, sino también por los trastornos que producen las inundaciones, ha continuado una vez finalizada su actividad de acuñamiento. El puente contiguo a la Casa de la Moneda también sufrió los embates de las inundaciones, y tuvo que ser reparado al menos dos veces, en 1681 y en 1759 (AMSg 1413-6). Inundaciones históricas que se prolongan hasta nuestros días, incluso teniendo en consideración que en la cuenca alta del río Eresma se construyó el embalse del Pontón Alto, con cierta capacidad de regular y laminar las crecidas de bajos periodos de retorno; no así las grandes crecidas de alto periodo de retorno, puesto que suelen acontecer cuando la presa ya está completamente llena.

Los análisis dendrocronológicos realizados por Mar Génova (UPM) en una cubierta de madera, descubierta en 2009 en los canales hidráulicos de la antigua Casa de la Moneda de Segovia (siglo XVI), han permitido datar las fechas aproximadas de su instalación y/o reposición. Comparando estos datos con el registro documental de las obras de restauración en el edificio y con el inventario de inundaciones históricas en esa cuenca, se han podido correlacionar las fechas de las principales avenidas que afectaron al edificio entre los años 1583-90 y 1771. Efectivamente, en el mes de abril-mayo de 2009, durante las labores de investigación arqueológica en este complejo de la Casa de la Moneda para su rehabilitación como museo, apareció en el lecho del antiguo canal (caz) un entarimado cubierto por una gran cantidad de escombros. Este entarimado, que cubría los antiguos canales en roca originalmente construidos a finales del siglo XVI (Juan de Herrera ca. 1583-1590), limitaba con otra estructura de mampostería y sillería suprayacente, que se corresponde con el denominado canal de Sabatini (ca. 1771). Se tiene constancia documental de que los elementos de madera del complejo han sido al menos seis veces sustituidos y reparados total o parcialmente en los años 1615, 1648, 1677-78, 1701, 1770-71 y 1861. Estas sustituciones se han debido tanto a simples obras de mejora, como a desperfectos producidos por eventos singulares de avenidas e inundaciones (como se tiene constancia documental, por ejemplo, para el evento de 1678).

Se tomaron muestras de todo el material leñoso disponible: 4 vigas durmientes, 3 tablones de la tarima y 3 tacos de fijación de la estructura del canal. La hipótesis de trabajo fue que al menos las vigas, por su elevada dimensión y menor tecnología para el aprovechamiento y transformación maderera de la época, proviene cada una de un árbol. Sobre la procedencia del resto de los elementos fueron de gran ayuda los análisis dendrocronológicos. En total se obtuvieron 24 secciones transversales y posteriormente en laboratorio fueron secadas y pulidas. Para el conteo y medición de la anchura de los anillos, se empleó una mesa LINTAB bajo lupa binocular y la aplicación TSAP Win. Las secuencias de crecimiento obtenidas se sincronizaron entre sí, visual y estadísticamente, mediante las aplicaciones del programa citado y con el programa COFECHA. La datación final de las muestras se estableció utilizando la serie maestra de la Sierra de Guadarrama elaborada para el periodo 1513-1995.

La investigación histórico-documental se hizo por procedimientos convencionales de búsqueda sistemática en archivos (AGS, AGP, AHMS, AHPS…), bases de datos digitales (*segoviamint*), hemerotecas y publicaciones impresas; y tanto para la datación de obras de reparación en los canales (palabras clave: madera, pino, obra, Valsaín, canal, presa…), como para las avenidas históricas (palabras clave: crecida, avenida, desbordamiento, etc.). Para cada evento de inundación histórica detectado, se anotó la fecha, periodo y estimación de la magnitud del evento o de los daños ocasionados. Especial hincapié se puso en la documentación de las obras de reparación con referencia expresa de los daños en los canales producidos por eventos de inundación, como el escrito de 1678 en el que se cita expresamente que la obra se hace "…*por que lo referido esta mal tratado por averse entrado las abenidas del rio*…".

En las dataciones de los anillos más externos, correspondientes con fechas más próximas al momento de la tala de los árboles, parecen reconocerse tres poblaciones de fechas próximas entre sí: 1677-

1678, 1690-1700 y 1713-1742. Ello podría marcar al menos dos o tres momentos de reposición de maderas que podrían asociarse a: las reparaciones de 1648 después de los deterioros asociados a las inundaciones de 1626, 1627 y 1629; las reparaciones de 1678 y 1701, vinculadas a los daños de las avenidas de 1681 y 1695; y las reformas de 1770-71, en parte tras los daños de las avenidas de 1733 y 1759 (Fig.4).

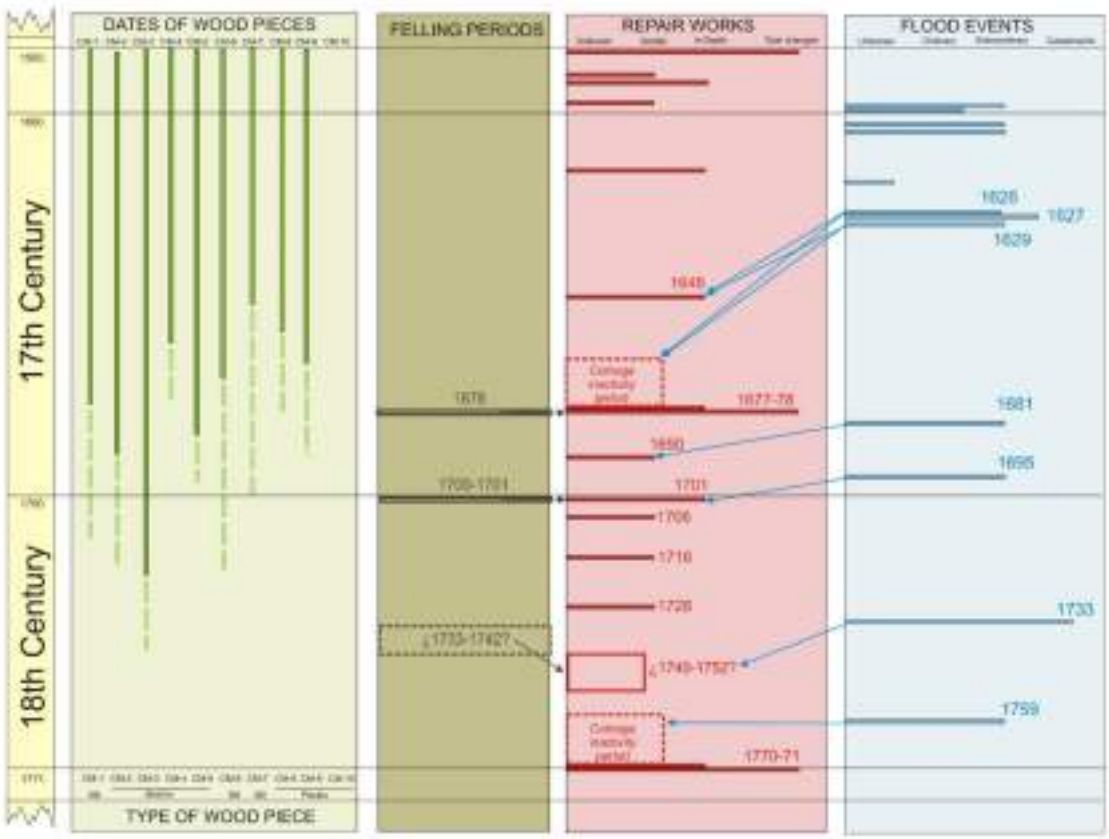


Figura 4. Cuadro de correlación entre las inundaciones históricas que afectaron a la Real Casa de Moneda de Segovia, las fechas de reparación de los canales, fechas de talado de madera y las edades de las maderas analizadas.

3. OTRAS INUNDACIONES HISTÓRICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA

Del resto de los ríos y arroyos de la provincia apenas se conservan noticias históricas aisladas de avenidas e inundaciones en el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (Ministerio del Interior, Gobierno de España) para localidades como San Miguel de Bernuy, Fuentidueña, Carrascal del Río, Hontanares de Eresma… Sirvan como ejemplo las noticias de inundaciones históricas recogidas en los archivos históricos y en las hemerotecas de la prensa histórica:

- 1793-08-20: tormenta que causó grandes y persistentes inundaciones y daños en la Tierra de Cuéllar, con varios fallecidos por arrastre y ahogamiento, y pérdida de centenares de cabezas de ganado. Una narración de la época cuenta que en San Cristóbal las aguas cubrieron todo el valle y se llevaron a un mozo y un niño, que murieron, que arrastraron las hazinas de mieses, carros y trillos y los arrastraron hasta el llano de Torre. En Vallelado sucedió lo mismo en las eras, pero también varias casas se vieron destruidas por el agua. En el convento de San Francisco de Cuéllar se llenaron los bajos de agua y piedras, y en la iglesia del convento las tarimas y los confesonarios flotaron en el agua y acabaron saliendo con el agua al exterior, a la plazuela ante el edificio. Los

frailes tuvieron que trasladarse a vivir al palacio, y allí hubieron de permanecer durante más de un año. También las monjas de la Concepción se trasladaron a Santa Ana. En la Dehesa de Cuéllar el agua se llevó 36 pollinas. También se ahogaron muchas vacas entre Montemayor y Valdeolleros. En el caso de los campos, el destrozo fue tal que quedaron irreconocibles. Entre Valdeolleros y Cuéllar todo era una laguna y en gran parte el agua se mantuvo durante diez meses, complicando el tránsito entre lugares.

- 1806-06-18: gran avenida que inundó el casco urbano y arrastró y mató la mayor parte del ganado (unas 4000 cabezas merinas; unos 4000 doblones) de la localidad de Paradinas, aunque sin producir víctimas mortales. Según relató el párroco de la localidad en esas fechas (Francisco Peláez): "*… veo que la calle de la puerta de la casa iba hecha un río pared a pared con el agua que venía de Aragoneses. Me trajeron una caballería para ir a la iglesia. Pasé con algún trabajo porque el arroyo rodeaba el puente… La avenida siguió toda la tarde de manera que el arroyo iba hecho un mar, de suerte que ni con mulas, ni con caballos nadie se atrevió a pasar*". El párroco narra cómo el agua subía más de una vara y a nivel de las puertas de todas las casas del mediodía, viendo pasar arrastrados cerdos, gallinas, maderos… "*la gente asustada saltando por las puertas traseras, subiendo a los sobrados*". La iglesia casi quedó rodeada por el agua, y si no penetró en ella fue por la hilera de céspedes colocada en el umbral de la puerta principal del templo. Donde sí penetró el agua fue en el cementerio, situado en un lateral del templo. El cura no pudo abandonar la iglesia y tuvo que pasar la noche en su sacristía, al igual que los obreros que arreglaban el chapitel del templo (Archivo Parroquial de Paradinas y El Adelantado de Segovia 2006-06-18).
- 1898-07-04: "*Según noticias, el lunes á las cinco de la tarde, descargó en los términos de Nava de la Asunción, Nieva y Ortigosa de Pestaño una horrible tempestad de agua y granizo, inundando la estación de este último pueblo, destruyendo la casa llamada de la Genara y obligando al posadero Víctor á sacar el ganado de la cuadra por temor á que se ahogara. En los campos, grandes desperfectos, que reducirán á la miseria á muchos infelices que esperaban la recolección como se esperaba el agua en Mayo*" La Democracia (1898-07-06) y La Tempestad (1898-07-10).

Recientemente, en las últimas décadas, se han llevado a cabo estudios científicos intensivos sobre inundaciones históricas y peligrosidad y riesgo, fuera de Segovia capital, en determinadas comarcas, localidades y parajes de la provincia:

- El entorno de los Reales Sitios (Valsaín y La Granja de San Ildefonso), se produjeron numerosas inundaciones históricas entre los siglos XVI y XIX, principalmente a finales del siglo XVI y principios del XVII (1598, 1599, 1618, 1627), la segunda mitad del siglo XVIII (1767, 1784, 1793, 1798, 1799) y finales del siglo XIX (1878, 1879); que fueron apuntadas en el Memorial Literario, por Daniel de Cortázar y estudiados por Teresa Bullón (UAM) a partir de fuentes documentales.
- Los Montes de Valsaín, concretamente las cabeceras de los arroyos de las Pintadas y los Puentes (entre los puertos de Navacerrada y Cotos), estudiados por Juan A. Ballesteros (U. de Ginebra, Suiza) y Clara Rodríguez mediante técnicas dendrogeomorfológicas y documentales.
- Pajares de Pedraza (Arahuetes) y su entorno, con métodos hidrológico-hidráulicos, dendrogeomorfológicos y documentales por Juan A. Ballesteros (U. de Ginebra, Suiza), Marta González (UAH), Andrés Díez (IGME), Julio Garrote (UCM), Nestor Bernal (Tragsatec) y Rodrigo Maroto.

Existen otros estudios puntuales de peligrosidad y riesgo de inundaciones que incluyen recopilaciones de inundaciones históricas en localidades como Lastras de Cuéllar, Sepúlveda, Villovela de Pirón… Y por supuesto los estudios asociados a la delimitación de las ARPSIs (Eresma en Segovia, Migueláñez, Miguel Ibáñez) y los planes de emergencia de presas (Burgomillodo, Linares, Las Vencías).

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer la colaboración y la cesión de valiosísima información documental a diversos historiadores, archiveros y bibliotecarios de la provincia de Segovia y, entre ellos, especialmente a: Guadalupe de Marcelo Rodao (Patrimonio Nacional), Isabel Álvarez y Rafael Cantalejo (Archivo Municipal de Segovia), Bonifacio Bartolomé (Archivo de la Catedral de Segovia), Antonio Ruiz Hernando (Real Academia de Historia y Arte de San Quirce) y Guillermo Herrero (librería Cervantes). Igualmente agradecer su colaboración como guías-intérpretes al equipo de la excursión divulgativa '*A todo riesgo. Convivir con los desastres geológicos cotidianos'* (Semana de la Ciencia), y especialmente a Nuria Sacristán, Fuencisla Vicente, Cristina Martín y Ernesto García. Agradecimiento extensivo a las decenas de informantes y entrevistados en las localidades de la provincia de Segovia, que no dudaron en compartir con nosotros sus conocimientos y creencias populares.

REFERENCIAS

- Díez Herrero, A., Martín Moreno, C., Sacristán Arroyo, N. y Vicente Rodado, F. (2007-2019). *A todo riesgo XIII. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-divulgativa para la educación en riesgos geológicos celebrada en el marco de la Semana de la Ciencia de Castilla y León 2019. IGME y Segovia Educa en Verde, Madrid-Segovia.
- Díez Herrero, A., Díez Herrero, A., De Marcelo Rodao, G. y Escobar Burgueño, A. (2020). *Los desastres naturales en la cultura tradicional segoviana*. Memoria final de la VII convocatoria de las Becas de investigación etnográfica 2019 del Instituto de la Cultura Tradicional Segoviana 'Manuel González Herrero', Diputación de Segovia, Segovia. (inédito).

MANIFESTACIONES CULTURALES POPULARES EN TORNO A LAS AVENIDAS E INUNDACIONES EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

RESUMEN

A pesar de que la provincia de Segovia se encuentra entre los territorios españoles con menor riesgo económico y social por avenidas e inundaciones, o precisamente por ello, la interacción de estos fenómenos con las comunidades humanas a lo largo de milenios ha configurado un interesante cuerpo de manifestaciones culturales populares en torno a las mismas, su explicación milagrosa o legendaria, predicción, prevención y corrección. Estas manifestaciones culturales en relación con las avenidas e inundaciones en Segovia podrían organizarse en cuatro grandes bloques, en función de si se trata de: i) sucesos milagrosos durante o tras las inundaciones, atribuidos a vírgenes y cristos; ii) actuaciones predictivas, para saber dónde y cuándo va a ocurrir la inundación; iii) actuaciones preventivas, para evitar que ocurran en determinadas zonas; iv) actuaciones correctoras, para reducir sus daños, mientras están ocurriendo o una vez ocurridas. Aunque muchas de ellas son comunes y ampliamente difundidas por otros territorios peninsulares, otras son manifestaciones culturales singulares, dignas de ser documentadas, recuperadas y conservadas en el futuro, como muestra de la percepción y resiliencia popular frente a las inundaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el origen de la Humanidad, las comunidades humanas han tenido que enfrentarse a los desastres naturales asociados a las inundaciones, que han interferido notablemente en la dinámica social y económica de las mismas, hasta el punto de condicionar el devenir histórico de culturas y civilizaciones (Mesopotamia, Egipto). Incluso para las sociedades contemporáneas, los desastres y catástrofes suponen hitos tan importantes en su trayectoria cultural, que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) declaró el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (1990-1999), y posteriormente ha convocado sucesivas conferencias y suscrito diferentes Marcos de Acción para la Reducción de Desastres como Hyogo (2005-2015) o Sendai (2015-2030).

A lo largo de la historia, las diferentes comunidades humanas han desarrollado todo tipo de estrategias y manifestaciones culturales tradicionales para predecir, prevenir y mitigar estos desastres, y con ello aumentar su resiliencia frente a los riesgos naturales en general y a las inundaciones en particular. Desde manifestaciones tangibles en forma de construcciones o artefactos, plasmación en documentos (textos e imágenes); hasta manifestaciones intangibles como paremias, danzas o música, han servido a las comunidades humanas para tratar de defenderse y convivir tradicionalmente con los desastres naturales de cada territorio, de forma singular y original. Sin embargo, las sociedades modernas, en un proceso de globalización mal entendido, han olvidado y dejado perder muchas de estas manifestaciones culturales locales ante los desastres, adoptando estándares internacionales; y, con

ello, muchas veces se han convertido en comunidades menos resilientes y peor preparadas ante las catástrofes naturales.

A pesar de que las avenidas e inundaciones han generado históricamente y aún en la actualidad, numerosos sucesos catastróficos y desastres en la provincia de Segovia (Díez-Herrero *et al.*, 2007-2019), lo cierto es que no existe un amplio acervo cultural popular sobre estos fenómenos, diferente del de otros territorios próximos de Castilla y León y resto del centro peninsular. Más allá de las manifestaciones culturales del ámbito religioso (rogativas *pro serenitatis*, procesiones y novenas pidiendo calma meteorológica e hidrológica, etc.) y los documentos técnico-científicos (informes, grabados, fotografías), existen pocas tradiciones o ritos en torno a las riadas y sus consecuencias en la provincia de Segovia (Díez-Herrero *et al.*, 2020). Esto puede deberse a varios factores:

- Las características del fenómeno en Segovia y su frecuencia-magnitud: las inundaciones extraordinarias en Segovia tienen una baja frecuencia; y afectan a localizaciones puntuales, con escasa extensión areal, por las pequeñas dimensiones de las llanuras de inundación de los ríos, que circulan encajados en gargantas, cañones y vegas bajas.
- La reducida interacción de la población segoviana con las márgenes y vegas de los ríos, en comparación con las planas y vegas del levante español, que ha limitado la afectación de las avenidas a las zonas de huertas, prados y choperas; sin afectar históricamente a las poblaciones, normalmente ubicadas en posiciones elevadas y protegidas de las inundaciones.

El objetivo de este trabajo es recopilar algunas de estas manifestaciones, clasificarlas e interpretarlas desde el punto de vista científico-técnico.

2. SUCESOS SUPUESTAMENTE MILAGROSOS EN RELACIÓN CON LAS INUNDACIONES EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA

Uno de los casos más singulares registrados en la provincia de Segovia es la advocación a Nuestra Señora del Pinarejo (localidad de Aldeanueva del Codonal), a la que en varias ocasiones se han encomendado los fieles para que les salve de las aguas crecidas o produzca avenidas para ahuyentar a los enemigos, obrando milagros para ello (Cuesta y Martín, 2003; Fig.1):

- "*Como represalia contra la gente del pueblo por haber asesinado a un general francés, los soldados vinieron al pueblo con la intención de arrasarlo y quemarlo, un día que los habitantes estaban de romería, llegando hasta el río, donde observaron a una mujer y, al intentar cruzarlo, éste se desbordó cubriendo el puente de piedra y las demás entradas, impidiendo el paso, y obligando a los franceses a retroceder hasta otro lugar. Desde entonces se cuenta que fue un milagro de esa mujer, y que esa Señora era la Virgen*". (Capítulo primero, Estudio del Medio).
- "*Un carro de trigo en q yban dos mozos que se los llevava el rio sin Remeº se encomendaron a Nª Sª y se libraron de la furia del agua*"



Figura 1. Detalle de la lámina del grabado del "*Verdadero Retrato de Nª Sª del Pinarejo…*", en la que se narran algunos hechos milagrosos atribuidos a la intercesión de la Virgen. Fuente: Cuesta y Martín (2003).

Del primer suceso, la llegada de tropas francesas a Aldeanueva del Codonal, sí que parece haber testimonio documental, puesto que en el acta del Cabildo celebrado en marzo de 1813 consta: "*Se celebró en esta parroquia de Aldeanueva del Codonal la función acostumbrada a la imagen de Ntra. Sra. del Pinarejo (…) Este cabildo no se finalizó por venir la tropa francesa, por lo que los hermanos se marcharon a sus casas*".

Otra advocación milagrosa en relación con las inundaciones es la Virgen del Henar, patrona de la comunidad y tierra de Cuéllar. Según relata De Villafañe (1726) en su "*Compendio histórico en que se da noticia de las milagrosas, y devotas imágenes de la reyna de cielos, y tierra, María Santissima que se veneran en los más celebres santuarios de España" hay un milagro atribuido a la Virgen del Henar (Cuéllar), que él resumen de la "Historia del Henar*", del Doctor Gregorio Baza (1695), en relación con la salvación de una religiosa de las aguas, al encomendarse a la Virgen.

También es el caso de la Virgen del Río (San Miguel de Bernuy), a la que en ocasiones se ha pedido, haciendo honor a su nombre, que bajen las aguas de las crecidas del próximo río Duratón, o que parase de llover para evitar las inundaciones (Fig.2).



Figura 2. Imagen de la Virgen del Río (San Miguel de Bernuy), en el altar de la ermita situada a las afueras de la localidad, próxima al río Duratón.

En el entorno del Santuario de la Virgen de la Fuencisla, en el entorno de la ciudad de Segovia, existe un alto riesgo por inundaciones asociadas al desbordamiento del río Eresma durante eventos de avenidas súbitas y crecidas, que se ha plasmado históricamente en más de una treintena de desastres de inundación en el valle del Eresma a su paso por Segovia entre los años 1304 (primera inundación documentada) y 2014 (última de consecuencias importantes; Díez-Herrero *et al.*, 2007-2019). El hecho de que unas pocas de estas inundaciones no hayan producido daños humanos o materiales significativos, o bien la salvación de personas arrastradas en las mismas (o en otras acontecidas en otros ríos de la provincia y península) ha sido atribuido históricamente a la intercesión de la propia

Virgen de la Fuencisla. La referencia más antigua a esta manifestación cultural se encuentra en algunas de las preguntas realizadas en la 'Probanza' del Notario Maldonado (1611) a los testigos presentados por parte de la ermita, cura y cofrades de la Virgen, en las que se les interroga sobre su conocimiento de determinados hechos milagrosos relacionados con intercesión de la Virgen ante avenidas e inundaciones; concretamente, que "…*digan lo que saben*…" sobre:

- Pregunta 11. Crecida del Eresma en 1603.
- Pregunta 50. Inundación por tormenta (turbión) en 1587.
- Pregunta 63. Crecida del Milanillos en 1611.
- Pregunta 68. Crecida de un río cerca de Peñaranda de Bracamonte, en 1607.
- Pregunta 74. Crecida del río Moros en 1603.
- Pregunta 79. Crecida del Eresma en 1612.

Hay un factor común en las descripciones de estos hechos supuestamente milagrosos por la intercesión de la virgen de la Fuencisla: la inmediatez de ascenso súbito de los caudales y los niveles del río Eresma en las avenidas de finales del siglo XVI e inicios del siglo XVII, que no daba tiempo a las personas y los animales a reaccionar y ponerse a salvo; y la consiguiente velocidad y turbulencia de la corriente. Se trataba de avenidas súbitas, muchas veces asociadas a lluvias torrenciales estivales de tormentas convectivas locales, tan características de los cambios climatológicos del inicio de la Pequeña Edad de Hielo.

También la intercesión de la Virgen de la Fuencisla en el desprendimiento de 1536 sirvió según Alcalá Yáñez (1615) para salvaguardar la iglesia del Santuario de las inundaciones del Eresma, como si la actuación milagrosa de la Virgen tuviera no una, sino dos consecuencias positivas:

> *"Aquellas grandes piedras han servido después para reparar un gran malecón que está sobre la nueva iglesia de la Fuencisla, defendiéndola de las inundaciones y sujetando el curso del Eresma, habiendo hecho así servir para reparo del templo de María lo que por una ley física y natural debió causar su completa ruina".*

Por último, también se ha atribuido a la Virgen de la Fuencisla la actitud de los devotos y el protagonismo de la Hermandad o Cofradía, en la captación de fondos para sufragar la corta artificial del arco de meandro del río Eresma, llevada a cabo entre marzo y octubre de 1846, para evitar que la corriente dañase la cimentación del Santuario y la inundación del mismo durante las principales avenidas y crecidas.

3. MANIFESTACIONES CULTURALES TRADICIONALES PREDICTIVAS DE LAS INUNDACIONES

Entre las manifestaciones culturales predictivas sólo cabe destacar los pronósticos relacionados con las predicciones meteorológicas populares en forma de cabañuelas o pronósticos a corto plazo. Este tipo de pronósticos se supone que permiten saber con antelación en qué estación, mes, quincena o incluso semana se producirán lluvias intensas o nevadas copiosas que pueden fundirse repentinamente y aumentar los caudales de los ríos y arroyos de Segovia. Sin embargo, la capacidad predictiva a medio o largo plazo no está demostrada científicamente. La predicción a corto plazo, basándose en observaciones meteorológicas y del comportamiento de los animales, puede tener algún fundamento científico y mayor grado de certidumbre. Es el caso de los pronósticos sobre las precipitaciones intensas en los siguientes días, que realizan los pastores la víspera, observando el comportamiento del ganado y las instalaciones. D. Pedro Sanz (La Rades de Abajo) afirma que: *"...cuando se orea rápido el corral, eso quiere decir que al día siguiente va a llover, y puede que mucho*".

4. MANIFESTACIONES CULTURALES TRADICIONALES PREVENTIVAS DE LAS INUNDACIONES

Entre las manifestaciones culturales preventivas, además de las relacionadas con impedir que se produjera la lluvia intensa en tormentas (toque de campanas, ruegos a Santa Bárbara), la prevención se hacía fundamentalmente tratando de garantizar la capacidad de evacuación de los cauces de ríos y arroyos. Para ello, consideraban fundamental lo que las gentes del campo denominan 'limpieza' de los ríos (Fig.3), incluyendo tanto la ausencia de obstáculos naturales (vegetación leñosa, vegetación arbustiva, restos de ramas y hojas, barras de gravas y arenosas…), como artificiales (basura, restos de vallados y prácticas agrícolas y ganaderas, etc.). Para conseguir esta 'limpieza' cada propietario de finca se ocupaba de realizar extracciones en los cauces propios; y en terrenos públicos o en los principales ríos y arroyos se hacían trabajos comunales, como las hacenderas. De nuevo Pedro Sanz, pastor jubilado, nos relata como siempre (segunda mitad del siglo XX), un día al mes, se juntaban los hombres del municipio y 'limpiaban' los cauces en hacenderas, parecidas a las de conservación y mantenimiento de las caceras artificiales. Muchos entrevistados del medio rural atribuyen el mayor número de inundaciones y daños por las actuales riadas de los ríos segovianos a la 'falta de limpieza' de los cauces, que ya no se cuidan ni limpian, sobre todo por restricciones de las autoridades de gestión del agua (Confederación) o medioambiental (guardas forestales o agentes medioambientales de la Junta de Castilla y León) a quienes acusan de dedicar cada vez menos dinero al mantenimiento y limpieza de los ríos. De hecho, casi todos los alcaldes entrevistados presumen de haber conseguido fondos económicos o jornadas de personal para realizar limpiezas de los cauces de su municipio, sobre todo los tramos urbanos o aguas arriba.

Un menor número de encuestados atribuyen la mayor inundabilidad de los ríos y arroyos a la ocupación de las márgenes por construcciones de nueva planta (naves, viviendas), en zonas en las que tradicionalmente no se construía por respeto a la dinámica del río; y menos aún lo atribuyen al cambio climático o global, porque afirman que, al contrario, "…*ahora ya los ríos no traen el agua que traían antaño; entonces sí que había riadas y no ahora*".



Figura 3. Labores de desbroce de vegetación arbustiva y herbácea ('limpieza') en el cauce y las márgenes del arroyo San Medel a su paso por Bernuy de Porreros, con posterioridad a eventos de inundación importantes en otras localidades españolas.

Una curiosa manifestación popular en torno a la prevención de las inundaciones del río Frío es la conocida leyenda de "El tragón del rastrillo", recogida en la localidad de Madrona (López, 2002 y 2012):

> "-*¡Maldito y cien veces maldito sea este río!* – decía un pastor dando con la punta de su garrote en el suelo como si quisiera hacer un agujero- *que me ha ahogado parte del rebaño*.
> Así se explicaba y gesticulaba un atajero que guardaba el rebaño en una red cerca de lo que se conoce como "el Rastrillo" y que es cuando el río Frío sale del monte donde está el palacio que lleva el nombre de Riofrío. Cerca de este río pasa el camino que penetra por unas hermosas puertas al monte, y al otro lado unas laderas peladas por donde han pastoreado siempre los rebaños de ovejas. Pues en ese valle acostumbraba este pastor a tener la red y más de un año le toco ir corriendo a mover las ovejas, pues cuando se desbordaba el río llegaba hasta el redil. Madrona también se inundaba como medio pueblo, la parte baja, las eras del Mercado, la plaza y la Mancha y así sucedió varios años, pero el año que el pastor echaba pestes se inundó más de lo normal, llegó el agua hasta su redil y ahogó la mitad de la piara.
> -*¡Maldito y cien veces maldito sea este rio!* -continuaba diciendo el pastor - *y quiera el Santo Cristo de la Salud que aquí mismo donde yo doy con el garrote se abra un agujero que comunique con una gruta subterránea que haga pasar el agua al otro lado del pueblo para librarnos de estas inundaciones*.
> Y dicho y hecho. Comenzó el agua a meterse bajo tierra disminuyendo así el caudal que bajaba hacia el pueblo, yendo a parar parte a lo que se conoce como la Sima y otra parte pasado el

> pueblo en la zona de Bernuy de Palacios. En años posteriores se hizo aguas arriba el pantano [embalse] de Revenga que liberó de muchas inundaciones al pueblo, pero aún hoy se puede ver el tragón o ladrón de agua que hay bajo la presa del Rastrillo y que cuando en verano mengua el caudal del río se ve perfectamente desaparecer el agua secándose el cauce en ese punto."

Efectivamente existe, en el lecho del cauce del río Frío, en las proximidades de la valla de salida del recinto del Bosque de Riofrío (conocido como "El Rastrillo por su forma; Fig.4), una poza con lecho en roca calcárea (dolomías y areniscas dolomíticas cretácicas), con un sumidero por el que se infiltra parte del caudal del río hacia el acuífero kárstico infrayacente, para volver a manar aguas abajo de Madrona, donde la superficie del terreno intersecta con la superficie freática del acuífero. Por lo tanto, la leyenda está basada en observaciones reales de un fenómeno que es frecuente en los paisajes kársticos, muy frecuentes en la península Ibérica y en la provincia de Segovia, y especialmente visible cuando el caudal del río es reducido, porque la infiltración detrae buena parte del mismo, dejándole incluso seco aguas abajo del sumidero.



Figura 4. Puente-vallado que sirve de salida del río Frío desde el Bosque de Riofrío hacia Madrona, que por la forma de las rejas recibe el nombre de "El Rastrillo".

De hecho, ha sido corroborado por técnicos del Instituto Geológico y Minero de España y alumnas de la Universidad Complutense de Madrid, mediante aforos directos con molinete en el río Frío, tanto aguas arriba del 'tragón', como en la localidad de Madrona. Ahora bien, el hecho de que, según narra la leyenda, esa infiltración de agua del río Frío aguas arriba de Madrona, fuera suficiente como para reducir su caudal hasta el punto de impedir su desbordamiento, es un hecho científicamente cuestionable. La capacidad de almacenamiento y transmisividad de ese acuífero kárstico es muy limitada, al ser tener poco espesor y volumen de huecos karstificados; y además en periodos de avenidas del río Frío, el acuífero suele estar saturado con la superficie freática muy elevada, lo que impediría una infiltración significativa como para laminar la avenida y reducir la inundación de las fincas, los rebaños de ganado de las márgenes y la localidad de Madrona. No obstante, esta leyenda es una curiosa manifestación cultural, fruto de la observación popular de la naturaleza, y muy ingeniosa en su planteamiento.

Otra leyenda asociada a las inundaciones en la provincia de Segovia procede de la iglesia de la Virgen de las Vegas (Requijada), que narra una gran inundación del río Cega que acabó con una antigua población existente en su vega, obligando a su traslado a la actual Requijada (Gil Alonso, 2013):

> "*Sobre la leyenda, que corre en boca de los más mayores del lugar, y que pasa de padres a hijos, sobre que una gran inundación del río Cega anegara, arrasara y desrtruyera las poblaciones cercanas en la conocida como la Vega, Y que los supervivientes ante el devastador panorama causado, decidiesen trasladarse a un lugar separado como un altozano, para asentarse allí y crear un nuevo núcleo de población, hoy conocido como Requijada*"

Modesto Matías Ramiro (alias 'Matías'), un vecino jubilado de Requijada, miembro de la Asociación 'Amigos de Nuestra Señora Virgen de las Vegas', afirma al respecto: "*Efectivamente parece que hubo una población romana en lo que ahora se conoce como Chavida (en el entorno de la ermita), a la que habría dado nombre; y según el libro de Miguel Ángel Gil, fue una inundación lo que acabó desplazando el poblado a lo que hoy es Requijada*". Esta leyenda puede tener un origen basado en un fenómeno histórico cierto, pero que tanto pudo estar relacionado con el desbordamiento del Cega en su amplia llanura, como con una avenida súbita de los barrancos laterales, produciendo el aterramiento de la antigua localidad.

Este tipo de leyendas de traslado de pueblos desde otras situaciones en el término, como consecuencia de grandes avenidas o aluviones que destruyen el pueblo antiguo, es una constancia en diversas localidades de Segovia, especialmente las que conservan ruinas romanas o medievales, despoblados o ermitas alejados del actual núcleo urbano. Es el caso de Juarros de Riomoros, donde los vecinos narran cómo "*antes el pueblo estaba en la vega del río, pero una crecida o un cambio del canal del río hizo que subiéramos el pueblo a donde está ahora. Del viejo pueblo se conservan restos en el paraje donde se encontró la Virgen del Pollo* [patrona de Juarros]*, en unas cuevas de ladrillo que usábamos para proteger los tomates de las primeras heladas y conservarlos más tiempo…*" (María Santos Moreno, com. pers.).

5. MANIFESTACIONES CULTURALES TRADICIONALES CORRECTORAS DE LAS INUNDACIONES

Finalmente, entre las manifestaciones culturales populares de carácter correctivo o reparador de los daños y efectos de las riadas, se encuentran sólo las rogativas *pro serenitatis*, mucho menos frecuentes en el registro documental que las rogativas *pro pluvia*, en ocasiones combinadas con procesiones, misas, novenas, etc. Entre estas manifestaciones religiosas de carácter paliativo de las inundaciones sólo cabe reseñar las advocaciones a determinadas vírgenes y cristos, a los que en ocasiones se les pide que intermedie para salvar a personas durante las crecidas o avenidas (ver apartado de los hechos supuestamente milagrosos).

Por ejemplo, tras la riada que aconteció en la localidad de Paradinas el 18 de junio de 1806, el párroco de entonces, Francisco Peláez, junto con el Concejo decidieron que dicho día se recordara en años venideros con una misa de acción de gracias porque se pudieron evitar las desgracias humanas. Según López Soblechero (2004), *"…con ese motivo y habida cuenta del Ordinario, acordó celebrar misa cantada con Su Divina Magestad, sermón y procesión con el Santísimo y así lo viene haciendo, excepción hecha del sermón, como consta en el libro de Colecturía que da principio en 1851 en el que figura además daban de limosna a la Iglesia una libra de cera, 15 reales al sr. Cura y al sacristán 8; aún están muy presentes las fiestas del Centenario de aquel día que pudo, y por la misericordia de Dios no lo fue, ser completo en desolación sin excepción en lutos, en la memoria de mis feligreses, a quienes oigo hablar con entusiasmo religioso del que fui testigo, como nunca viendo número de*

forasteros, en el que todos tomaron parte a la cabeza de sus paisanos fueron todos los sacerdotes hijos de este pueblo, los seminaristas también, hoy como ellos sacerdotes, en quienes, fuera lisonja, diciendo la verdad tan solo, por ser nada comunes se distinguen igualmente la ciencia, la virtud y un bien manifestado empeño de que su pueblo fiel a sus tradiciones, mantenga muy por una de las cosas de la tierra sus creencias religiosas.". La tradición de dicha misa se rompió hace algunas décadas, pero se recuperó puntualmente en el año 2006 con motivo del bicentenario, celebrándose una misa (El Adelantado de Segovia, 2006-06-18).

6. OTRAS MANIFESTACIONES CULTURALES TRADICIONALES SOBRE LAS INUNDACIONES

También son escasas y puntuales las manifestaciones culturales en forma de limnimarcas de inundaciones pretéritas, plasmadas en inscripciones, placas y marcas de altura alcanzada por la inundación. Tan sólo se tiene constancia de la existencia de dos placas metálicas grabadas que recuerdan la inundación sufrida en sendas viviendas de la localidad de Pajares de Pedraza (municipio de Arahuetes) en 1996, y cuyo propietario decidió instalar en el muro de una barra-mostrador de la bodega, y en el muro exterior de un patio trasero de la casa (Fig.5).



Figura 5. Situación de una placa metálica en el mostrador cubierto de madera de una bodega en una casa particular de Pajares de Pedraza, recordando el nivel alcanzado por la inundación de 1996.

Otro importante legado cultural popular lo constituye el refranero castellano que, aunque ya desde hace décadas uniformizado y globalizado, aún conserva paremias y refranes característicos o más empleados en cada región o provincia. En el caso de las paremias y refranes relacionados con las avenidas e inundaciones asociadas a los ríos y arroyos, se tiene constancia por testimonios orales del uso difundido en la provincia de Segovia, de muchos de ellos (Rodríguez de la Torre, 2012).

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer la colaboración y la cesión de información documental al resto de los componentes del equipo *¡Bueno Majo!*, formado por Guadalupe de Marcelo, Alberto Díez y Adrián Escobar; que han disfrutado de una beca de investigación (2019-2020) del Instituto de la Cultura Tradicional Segoviana 'Manuel González Herrero', de la Diputación de Segovia, bajo la tutoría del profesor José Luis Alonso Ponga (Universidad de Valladolid). Igualmente agradecer al tristemente fallecido Fernando Rodríguez de la Torre, que compartiese con nosotros su conocimiento sobre las paremias y el refranero castellano sobre avenidas e inundaciones. Agradecimiento extensivo a las decenas de informantes y entrevistados en las localidades de la provincia de Segovia, que no dudaron en compartir con nosotros sus conocimientos y creencias populares.

REFERENCIAS

- Alcalá Yáñez y Ribera, J. de (1613). *Milagros de Nuestra Señora de la Fuencisla, grandezas de su nuevo Templo, y fiestas que en su translacion se hizieron por la ciudad de Segovia...* Emprenta [sic] de Antonia Ramírez, 1615, Salamanca, 1 v.
- Cuesta Jorge, L. y Martín Rodríguez, M. T. (2003). *Nuestra Señora del Pinarejo, su Cofradía y su Ermita*. Colaborador: P. Agüero Bartolomé. Obra Social Caja Segovia, Segovia.
- De Villafañe, J. (1726). *Compendio histórico en que se da noticia de las milagrosas, y devotas imágenes de la reyna de cielos, y tierra, María Santissima que se veneran en los más célebres santuarios de España*. Imprenta de Eugenio Garcia de Honorato, Salamanca.
- Díez Herrero, A., Martín Moreno, C., Sacristán Arroyo, N. y Vicente Rodado, F. (2007-2019). *A todo riesgo XIII. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-divulgativa para la educación en riesgos geológicos celebrada en el marco de la Semana de la Ciencia de Castilla y León 2019. IGME y Segovia Educa en Verde, Madrid-Segovia.
- Díez Herrero, A., Díez Herrero, A., De Marcelo Rodao, G. y Escobar Burgueño, A. (2020). *Los desastres naturales en la cultura tradicional segoviana*. Memoria final de la VII convocatoria de las Becas de investigación etnográfica 2019 del Instituto de la Cultura Tradicional Segoviana 'Manuel González Herrero', Diputación de Segovia, Segovia (inédito).
- Gil Alonso, M. A. (2013). *Requijada. Ese rincón apartado*. Editorial El Fantasma de los Sueños, S.L., Valencia.
- López García, J.C. (2002). *Leyendas de la Fontán de Salá y otras leyendas de La Losa*. Taller Imagen S.L., Segovia.
- López García, J. C. (2012). *Leyendas y narraciones J.C.* Blog: http://leyendasynarracionesjc.blogspot.com.es/
- López Soblechero, I. (2004). *1776/1854 Paradinas y Fray Esteban de las Monjas. 150 aniversario de las "Santas Reliquias".* http://eparadinas.webcindario.com/150aniversarioreliquias.htm
- Maldonado, F. de la P. (1611). *Provança de los sucesos milagrosos que nuestro señor a obrado con los devotos de nuestra señora de la fuencisla, echa a pedimiento de la hermita y confrades de ella*. Notario Francisco de la Peña Maldonado, Segovia, manuscrito.
- Rodríguez de la Torre, F. (2012). Patrimonio cultural inmaterial de interés geológico: 300 paremias españolas relativas a inundaciones, avenidas y lluvias torrenciales. *De Re Metallica*, 18, 27-42.

MEDIDAS Y ACCIONES PREVENTIVAS CONTRA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL SEGURA: UNA PERSPECTIVA HISTÓRICO-JURÍDICA

Francisco José Abellán Contreras
Departamento de Ciencias Histórico-Jurídicas, Universidad de Alicante, España
fj.abellan@ua.es

RESUMEN

El territorio de la Cuenca del Segura es una de las áreas de la geografía española con mayor riesgo de inundaciones por crecida fluvial; riesgo que apenas ha disminuido en las últimas décadas a pesar de la planificación y ejecución de numerosas infraestructuras de prevención contra avenidas o escorrentías. En época de crecida, debido tanto al abandono progresivo del sistema de "boqueras" como a la falta de coordinación en la ejecución de las labores de mantenimiento del sistema de riegos, se ha incrementado, en los últimos años, el riesgo por inundaciones en este territorio del sureste peninsular. Por ello, el objeto del presente estudio se centra en el análisis de las principales medidas y acciones preventivas contra las inundaciones en la Cuenca del Segura, fundamentada en el rigor de las fuentes legales e historiografía.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones conforman una catástrofe natural que con cierta frecuencia se repiten en todo el territorio peninsular y, en particular, en la fachada mediterránea en la que se localiza la Cuenca del Segura. Así es, esta es una de las áreas con mayor riesgo de inundaciones de todo el país, pues desde tiempos inmemoriales -y hasta nuestros días- ha padecido numerosos episodios de lluvias torrenciales agravadas tanto por la expansión de la agricultura intensiva de huerta como por los usos urbanos, industriales y turísticos/recreativos (Romero y Maurandi, 2000; Olcina, 2005; Rodenas, 2013). Tres son los elementos tradicionales y paradigmáticos que explicarían el elevado riesgo de inundación en este territorio: régimen de precipitaciones (causa atmosférica y climática), elevada densidad poblacional (causa geográfica), y alta ocupación del espacio de riego de avenida fluvial (causa antrópica), lo que se traduce en la invasión -por el hombre- de humedales o zonas húmedas, barrancos, ramblas y cañadas para uso agrícola e industrial (Olcina, 2005; Calvo 1969).

Asimismo, como aducen algunos expertos en la materia, entre los principales factores que incrementan, de manera exponencial, la peligrosidad de las inundaciones -por desbordamiento del cauce fluvial- destaca el solapamiento de las ondas de crecida de dos ríos más importantes: el Segura y el Guadalentín (Marín, 1977; Calvo, 1969; López y Gutiérrez, 1983). De igual modo, la disimetría de la red principal de drenaje que dificulta el proceso de desagüe, favorece a su vez el estancamiento de las aguas, especialmente en la Huerta de la Vega Baja y Murcia. Por otro lado, tanto el sistema de riego tradicional (acequias, azarbes y azudes) que jalona ambas huertas, como el abandono o sustitución progresiva del sistema de boqueras que aprovecha o reutiliza en la huerta varias veces los caudales de agua de ramblas y barrancos, también constituyen un importante factor de riego de inundación en la zona (Romero, 2000; Bautista, 1989; Canales, 2005).

En épocas de crecidas, el sistema de acequias -"aguas nuevas"- y azarbes -"aguas muertas"- puede llegar a convertirse en un difusor de la inundación al distribuir la crecida por todo el territorio, si no

se siguen las normas y medidas diseñadas y realizadas desde tiempo inmemorial para su correcto drenaje, ya que los azarbes se transforman en nuevos brazos de la crecida e invierten el sentido de su flujo normal (de la huerta al río) causando importantes daños en la superficie cultivada a causa del estancamiento de las aguas (Canales, 2005; Romero, 2000). De ahí, que en nuestra propuesta sea la de incidir en la importancia de una adecuada labor de limpieza y conservación de la densa red de canales de riego y avenamiento de la huerta por parte de los regantes -en cumplimiento de los estipulado en las respectivas Ordenanzas- y, por otro lado, la expansión del sistema de "boqueras" que permite la captación de aguas de escorrentía y avenidas que de otro modo serían desaprovechadas, al tiempo que se evita el estancamiento o embasamiento de tierras (Abellán, 2019).

2. GESTIÓN DE LA PREVENIÓN DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL SEGURA

2.1. La inadecuada coordinación en la ejecución de los trabajos de mantenimiento del sistema de riego y su relación en las inundaciones en la Huerta oriolana y murciana

El actual y complejo sistema de riegos de la huerta de la Vega Baja del Segura y Murcia se inicia en las presas (azudes) de derivación que, de manera trasversal, atraviesa el lecho fluvial. De ahí parten la densa red de canales de riego -"acequias"- que suministran, por gravedad, las aguas del río Segura por toda la superficie cultivada. A su vez, esta tupida red se desdobla de otra de inversas características -"azarbes"- que devuelven las aguas sobrantes nuevamente al río (Calvo, 1969; Canales, 2016; Abellán, 2019). Mediante este sistema, los antiguos pobladores musulmanes, lograron un uso racional de los exiguos caudales fluviales disponibles, a la vez que lograban una completa reutilización de las aguas sobrantes (Martínez Almira, 2019). La sofisticada red de regadío con conducciones de recogida y reutilización de las aguas sobrantes dio origen al sistema de doble circulación de aguas vivas -o de riego- y muertas -o de drenaje- que caracteriza la huerta oriolana y murciana gracias a la cual se logra un óptimo aprovechamiento de las aguas de avenida y escorrentía para el riego de las tierras (Martínez, 2010; Canales, 2005; Martínez-Almira, 2018).

Esta red de canales de riego y drenaje, tan característico de la Huerta de Murcia y Orihuela, contribuye en ocasiones a maximizar los efectos de las inundaciones en la zona por crecida de los ríos. Así es, a la estrechez de los canales de drenaje, en algunos tramos del circuito hidráulico, habría que sumar también que tras la crecida y desbordamiento de los ríos -por lluvias torrenciales-, los azarbes quedaban inutilizados y se veían obligados a invertir el sentido de su flujo normal al convertirse en nuevas "arterias" de la crecida y difusores de la inundación (Canales, 2005; Romero, 2000). Esto es debido, en la gran mayoría de los casos, al incumplimiento de las obligaciones de los comuneros de practicar, de manera periódica, un correcto mantenimiento y limpieza de las acequias y azarbes con el fin de eliminar la broza, lodo, cañizo y demás inmundicias que pudieran obstruir u obstaculizar el circuito normal de las aguas.

Por otro lado, se pone de manifiesto que el espacio irrigado que circundaban la capital murciana y la ciudad de Orihuela ha ido cediendo, paulatinamente, a la expansión urbanística e industrial, de manera que en estos momentos es mayor el nivel de vulnerabilidad y exposición de la población del Medio y Bajo Segura (Ferreras, 2004; Olcina, 2005; Muñoz, 2005). Asimismo, otra circunstancia que también favorece el riesgo por inundación, es el abandono y/o sustitución de prácticas agrarias tradicionales como, por ejemplo, el riego de turbia -sistema conocido también como "práctica de boqueras"- cuyo objeto principal es el aprovechamiento racional de las escorrentías tras episodios de lluvias para el riego de las tierras y abastecimiento de aljibes y cisternas (Pérez, 2008; Olcina, 2005). En base a lo expuesto se puede afirmar que, en el caso de desaparecer este sistema de riego tradicional, tan característico del sureste peninsular, se incrementaría el riesgo por inundación en la zona, porque este sistema además de favorecer el aprovechamiento de las aguas, es un excelente elemento de contención o freno de las aguas de avenida y escorrentía al evitar su estancamiento por su reutilización en la huerta (Canales, 2005; Abellán 2019).

2.2. Actuaciones y medidas de prevención frente a inundaciones a la luz de las Ordenanzas de riego (ss. XIII-XX)

La primera reglamentación de la que se tiene constancia para ordenar y regular las aguas del río Segura, en la Huerta de Orihuela, es un Privilegio concedido por Alfonso X *El Sabio* en el año 1275. Para una correcta gestión de las aguas y evitar tanto el robo de agua como daños materiales en la Huerta, por acumulación del líquido el elemento, este Privilegio imponía importantes medidas coercitivas para disuadir a los infractores (Canales, 2016). En este sentido, por ejemplo, la normativa imponía multa de 10 maravedíes al que obstaculizaba el curso normal del agua en la acequia, e idéntica pena para quienes alterasen la red de riego y avenamiento o no realzasen correctamente las labores de "monda" (limpieza) de las canalizaciones. En este sentido, se ha de tener en consideración que una correcta labor de mantenimiento, conservación y limpieza de los canales de riego y avenamiento no sólo se lograba un racional aprovechamiento de las aguas del río, sino también un correcto drenaje de las aguas muertas y pluviales (Abellán, 2019a; Canales, 2016; Molina 1977).

En la Edad Moderna, este Privilegio quedó obsoleto ya que era incapaz de acabar con las malas prácticas en la gestión de las aguas y resolver los problemas de la Huerta, por ello, en el año 1625 se aprobaron las llamadas *Ordenanzas de Mingot* (Martínez Almira, 2018; Abellán, 2019; Canales, 2016). En materia de infraestructuras de riego la norma disponía que para evitar fugas que pudieran causar graves daños en la Huerta, las acequias debía ser obras sólidas -de piedra y mortero- "con sus encajes que se puedan cerrar con tablas y que dichos partidores estén del costón de la acequia y retirados una bara o arroba de aquélla", con el fin de evitar que el lodo obstruyera los canales (*Ordenanzas de Mingot,* Cap. XVII). Asimismo, se practicarían anualmente (a comienzos del mes de marzo porque es cuando los caudales son menores) las labores de "monda" en todas las acequias de la Huerta y se "escombraran y desbordaran las yerbas -de cabeza a cola- en el mes de agosto", para evitar también que la hierba o cañizo impidieran la conducción normal del agua (*Ordenanzas de*

Mingot, Cap. XIII y XIV). Por otro lado, se prohibía que en las riadas o avenidas regar de parada bajo pena de multa de 10 libras y costear los contraventores la "monda":

> "Que en tiempo y ocasión de avenidas o que el agua del río venga mala y turbia, ninguno sea osado de regar con paradas, sino de corrible, porque con el regado de la parada se entarquina y enruna la acequia y causa mucho daño a los demás herederos y esto en pena de 10 libras" (*Ordenanzas de Mingot,* Cap. XXII).

El hecho de que solo se permitiera regar de "corrible" y no mediante el sistema tradicional de paradas (frenar la corriente del agua), conllevaba importantes peligros, entre otros: favorece tanto inundación del terreno como la erosión en los laterales de las canalizaciones, además de provocar la sedimentación de broza y fango en el fondo del cauce y, por tanto, la disminución de su capacidad. Esta prohibición, además, esconde una medida de prevención sanitaria ya que al evitar el uso de agua turbia -tras una avenida o riada- se impide cualquier contaminación y perjuicio para la salud pública en forma de epidemia infecciosa. Por otro lado, las Ordenanzas imponían a los regantes la necesidad de reforzar las canalizaciones escavadas en tierra con estructura sólida (de piedra y mortero) para evitar así la filtración de las aguas y la conversión de los azarbes en un nuevo brazo de la crecida. Y para el mismo propósito las Ordenanzas prohibían también plantar árboles y cañas en los márgenes de las acequias y azarbes (*Ordenanzas de Mingot.* Capt. XX). Asimismo, con el fin de proteger las infraestructuras hidráulicas, de cualquier perturbación que afectara a su correcto funcionamiento, se prohibía el tránsito de ganado por la Huerta, bajo pena de 100 sueldos a los infractores (*Ordenanzas de Mingot*, Cap. XXI).

La normativa, para la propia existencia de la Huerta oriolana como se observa, preveía la necesidad de un adecuado mantenimiento de las canalizaciones con objeto de que el líquido elemento sea aprovechado de manera eficiente por los regantes, y una vez cumplida su finalidad continuara su recorrido –nuevamente- hasta el río para evitar el estancamiento. Todas estas prohibiciones quedaron recogidas en las nuevas *Ordenanzas de la Huerta* oriolana del año 1836 cuya aplicación y vigencia se prolongó hasta el siglo XXI, pues se ha de tener en consideración que esta nueva normativa de riegos no era más que una adaptación de las anteriores a los nuevos tiempos. Con estas Ordenanzas –al igual que con las anteriores- se pretendía: proteger la Huerta, erradicar las malas prácticas en la distribución del agua entre los regantes, evitar el estancamiento y los daños en la superficie cultivada derivados de los diluvios e inundaciones por crecida del río Segura (Abellán, 2019; Martínez, 2012; Canales, 2016).

Convendría, en esta dirección, plantear una cuestión importante; ¿qué ha cambiado para que esas disposiciones, esas recomendaciones no se ejecuten como debe hacerse, cuando el sistema de riego se mantiene y la modalidad de reparto también? Aunque la esencia o espíritu normativo del antiguo privilegio del Alfonso X se ha dejado sentir con fuerza en las posteriores disposiciones normativas que regulan las aguas del río Segura -para el riego de la Huerta-, actualmente muchas de las recomendaciones descritas, por desgracia, no se cumplen del todo, a pesar de la imposición de medidas coercitivas (sanciones pecuniarias) para los contraventores. Siempre hay algún comunero irresponsable que hace un mal uso de las aguas e incumple su deber de desarrollar, en tiempo y forma, los trabajos de limpieza y mantenimiento de las canalizaciones que exigen las Ordenanzas.

Al igual que en Orihuela, la formación y consolidación del sistema de regadío de Murcia también se caracterizó por ser un proceso complejo de larga duración. Tras la Reconquista, Alfonso X ordenó la limpieza (o "monda") de las acequias -tanto a la población cristiana como mudéjar- y nombró para ello una serie de oficiales: *"sobreacequiero" y "acequieros"* (Torres,1985; Martínez, 2012; Lemeunier, 1995). Al primero le correspondía la administración de las aguas y todas las tareas relacionadas con el sistema de riego, además estaba plenamente capacitado para reprender las infracciones cometidas en el regadío. En cambio, los *acequieros* se ocupaban, entre otras cosas, de: recaudar el "acequiaje", repartir las aguas de riego y mantener en perfecto estado de conservación -y limpios- la densa red de canales de riego y avenamiento (Torres, 1975; Martínez 2012; Lemeunier, 1995). Respecto a estas últimas competencias, ya en las primitivas *Ordenanzas del reparto de las aguas* y *Ordenanzas de la Huerta de Murcia* –aprobadas y reformadas en tiempos de los Reyes Católicos- se sancionaba y castigaba con duras penas pecuniarias (multas) y corporales (azotes), el incumpliendo deliberado del deber de mondar las canalizaciones y conservarlas en óptimo estado, el tránsito de "yeguas, vacas y bueyes" por la huerta y la plantación de árboles y cañizo junto a las acequias y azarbes (Martínez, 2012). Con estas medidas preventivas –reproducidas también en las *Ordenanzas de agua* de 1695, 1702, 1790 y en las actuales del XIX- se pretendía evitar tanto las filtraciones y estancamiento de las aguas de riego y avenamiento, como la difusión de la inundación en caso de riada (Martínez, 2017; Torres,1985; Martínez, 2012).

Como se observa, en los campos y huertas de Murcia –al igual que en la Huerta de Orihuela- la solución al estancamiento y embalsamiento de las aguas en la superficie de cultivo giraba en torno a la realización periódica de las labores de limpieza y conservación de todas las canalizaciones por parte de los regantes, de conformidad con lo establecido en las respectivas Ordenanzas. Pero también, en el mantenimiento y protección del sistema tradicional de riego que con el aprovechamiento y reutilización de las aguas de avenidas o escorrentías se reducía de manera considerable los riesgos por inundación (Bautista, 1989; Pérez, 2008; Abellán, 2019). Este sistema, por sus múltiples benéficos ya expuestos, continúa practicándose en todo el territorio de la cuenca del Segura, pues queda demostrado que contribuye, de manera notable, a la protección de la huerta y al desarrollo sostenible de los recursos hídricos, al tiempo que contribuye a reducir los riesgos por inundaciones.

3. MARCO NORMATIVO EN MATERIA DE EVALAUCIÓN DE RIEGOS DE INUNDACIÓN

3.1. Consideraciones generales

Como marco para definir y regular las actuaciones dirigidas a frenar o reducir los efectos de las inundaciones por lluvias torrenciales y crecida de las cuencas fluviales debido, entre otros motivos, a la escasa capacidad de desagüe y estrechamiento del cauce se elaboraron numerosos proyectos de defensa, entre otros (Romero, 2000):

- El Plan de Defensa de Avenidas en la Cuenca del Segura de 1886, que agrupaba las obras en tres grandes bloques: obras que modifican el régimen de las aguas reduciendo el nivel máximo (presas de embalses y diques); acciones –indirectas- dirigidas a minimizar los daños por inundaciones.
- El Plan Nacional de Obra Hidráulica de 1933
- El Plan de Defensa de Avenidas en la Cuenca del Segura de 1977
- Plan de Defensa de Avenidas en la Cuenca del Segura promovida por el Real Decreto Ley 4/1987 de 13 de noviembre.

Ninguno de estos Planes de Defensa ha solventado, de manera satisfactoria, la problemática de las inundaciones en el territorio de la Cuenca del Segura. No obstante, se ha de destacar que la puesta en práctica del Plan de Defensa, aprobado por el Real Decreto Ley 4/1987, con la construcción, entre Murcia y Guardamar, del nuevo cauce del río Segura ha reducido las posibilidades de desbordamiento de este colector en su tramo final (Olcina, 2005; Romero, 2000). A pesar de este avance, continúa existiendo un riesgo real de inundaciones en los términos municipales de Rojales y Orihuela donde, a pesar de la ejecución de una serie de canalizaciones de drenaje, se mantiene, por el centro de sus poblaciones, el paso de las aguas del río Segura (Olcina, 2005). Y esto explicaría, en cierta medida, los últimos episodios de inundaciones registrados en la zona entre los años 2016 y 2019.

La “gota fría” de septiembre de 2019, en este sentido, por ejemplo, fue una de las inundaciones más graves y devastadoras que se han registrado en los últimos años en el país (con cinco fallecido y daños materiales valorados en miles de euros). Las lluvias persistentes, concentradas y torrenciales favorecieron el desbordamiento de los ríos y ramblas, anegando campos y núcleos urbanos. Al igual que en la inundación de 2016, los campos y huertas de Orihuela y Rojales, entre otras localidades de la comarca del Bajo Segura y Murcia, quedaron cubiertas por las aguas, ya que el sistema de riego tradicional favoreció la dispersión de la inundación por toda la comarca, motivado en gran parte, por la falta de manteamiento, conservación y limpieza de las acequias y azarbes (CHS. 2019).

En suma, la ocupación por el hombre de espacios de riesgos (ramblas, barrancos y llanos aluviales) para uso urbano, industrial y agrícola; la permisibilidad de la legislación (de aguas, suelo y ordenación del territorio) relativa a la prohibición de la invasión y ocupación de dichos espacios de riesgo; el abandono paulatino del sistema de riego tradicional y su mala gestión (incumplimiento de las Ordenanzas de riego respecto a la limpieza y conservación de la red de canales) constituyen los principales motivos a considerar para solucionar el grave problema de las inundaciones en la Cuenca del Segura.

3.2. Gestión preventiva y evaluación de riesgos por inundación

La lucha contra los devastadores efectos de las inundaciones se ha convertido, desde el siglo XIX hasta nuestros días, en una constante en la política de aguas de nuestro país. A nivel nacional, el Real Decreto 903/2010, de Evaluación y Gestión de Riesgos de inundación, se ocupó de regular tanto los mapas de peligrosidad y riesgo asociado a las inundaciones, como los procedimientos de evaluación

y gestión de dichos riesgos en toda la geografía peninsular. Sus disposiciones serán de aplicación a las inundaciones causadas por el desbordamiento del cauce de un río, torrente de montaña, entre otras corrientes de agua -intermitente o continuo- así como las inundaciones causadas por las aguas costeras y de transición. Con esta regulación se pretende lograr, por un lado, un adecuado conocimiento y evaluación de los riesgos de inundación y, por otro lado, obtener una adecuada coordinación de todas las Administraciones Públicas con el fin de reducir los efectos negativos tanto para la seguridad y salud pública como para el medio ambiente, patrimonio cultural, bienes (públicos y privados), actividades económicas e infraestructuras, derivados de las inundaciones (arts. 1, 2 y 3 R.D. 903/2010).

Para el cumplimiento de estos objetivos, la normativa confiere una serie de competencias específicas a las Administraciones públicas implicadas en el perentorio proceso de elaboración de los programas de medidas –preventivas- que incluyan obras de defensa y actuaciones concretas que se incorporaran a los planes de gestión del riesgo de inundación -cuyo ámbito territorial de aplicación será el de las demarcaciones hidrográficas-. En este sentido, la Administración General del Estado, las CC. AA y las administraciones locales se ocuparán de impulsar y desarrollar la evaluación y planes de gestión de riesgos asociados a las inundaciones, con el fin de garantizar la seguridad de las personas y bienes (arts. 4 y 5 RD. 903/2010).

Los organismos de cuenca, en colaboración con la Administración General del Estado y otros órganos competentes de las comunidades autónomas, se encargarán de la evaluación preliminar del riesgo de inundación e integrarán la evaluación preliminar elaborada por las Administraciones competentes en materia de costas. Esta evaluación, sobre la base de la información de que se disponga, deberá contener como mínimo (art. 6 RD. 903/2010):

a) Mapas de peligrosidad y de riesgos de inundación que muestren la topografía, usos del suelo, las cuencas y subcuencas hidrográficas.
b) Descripción pormenorizada de las inundaciones importantes acaecidas en el pasado con efectos negativos en la salud y seguridad pública, en medioambiente, en el patrimonio cultural e infraestructuras, para determinar las áreas sometidas a un riesgo significativo de inundación.

Por Decreto 30/2015, de 7 de mayo, se crea la Comisión de Coordinación y Seguimiento para el Desarrollo del RD. 903/2010 de 9 de julio, cuya principal función es coordinar la actuación de las Direcciones Generales afectadas por el citado Real Decreto, y de cualquier otra entidad u organismo que pudieran verse afectadas en el ámbito autonómico.

A nivel autonómico, en la Comunidad Valenciana –y en particular, en la comarca del Bajo Segura, las inundaciones constituyen un fenómeno natural que, de manera cíclica, ocasionan importantes daños materiales, personales y ambientales. La Generalitat, consciente de ello, fue pionera en la elaboración y aprobación de un instrumento básico para la gestión del territorio: "*El Plan de Acción Territorial sobre Prevención de Riegos de Inundación en la Comunitat Valenciana*", cuyos objetivos principales son:

- Obtener de un óptimo conocimiento y evaluación de los riesgos de inundación en solar valenciano.
- Establecer procedimientos administrativos para incorporar la variable de inundación a los proyectos, programas y planes que tengan una proyección sobre todo el territorio de la Comunidad Valenciana.
- Coordinación con todas las Administraciones Públicas y los Agentes Sociales para minimizar las consecuencias negativas de las inundaciones para la seguridad y salud pública.

El Plan, respecto a las actuaciones estructurales de defensa contra las inundaciones, distingue entre zona urbana y no urbana. Respecto a la primera, el nivel de protección de cualquier obra o

infraestructura de defensa deberá estar comprendido entre 500 y 100 años de periodo de retorno con la obligación de una justificación razonada de la adopción del nivel de diseño, siendo preferibles las actuaciones con tratamientos blandos (entre otros, zonas de desbordamiento o encauzamientos verdes). Por el contrario, el nivel de protección de una infraestructura u obra de defensa contra las inundaciones en zona no urbana deberá estar comprendido entre los 100 y los 25 años (arts. 25.1 y 3). Se ha de tener en consideración que los planes generales estructurales de los municipios que por sus condiciones geomorfologías e hidrológico-hidráulica, se hallen sujetos a riesgos por inundación estarán obligados a adoptar medidas de defensa para disminuir o eliminar el potencial riesgo. En el supuesto de que las medidas de defensa, estructurales o no, afecten a más de un municipio deberán ser coordinadas, en el ejercicio de sus respectivas competencias, por la Generalitat o por el Organismo de Cuenca (art. 24.1).

En cuanto a la gestión de las "Infraestructuras Verdes" frente al riesgo de inundación, éstas procuraran las mejoras de las funciones ecológicas de los humedales, ríos y otros ecosistemas que favorezcan no sólo la reducción del impacto del riego por inundación, sino también la conservación ambiental de los paisajes naturales vinculados con el líquido elemento (Melgarejo, 2012). Asimismo, con objeto de proteger los márgenes de los ríos y ecosistemas húmedos se favorecerá el uso como espacios libres y zonas verdes de las áreas colindantes con el cauce. Y todas las actuaciones estructurales deberán tener en cuenta la identificación de las vías de drenaje naturales como preferentes para el posible flujo desbordado. En particular, la planificación territorial y urbanística limitará, en cierto modo, los usos en el entorno de las zonas húmedas para que éstas puedan actuar como espacios naturales de desbordamiento natural (art. 23.1.2 y 7). En este sentido, por ejemplo, en la comarca del Segura, el proceso multisecular de creación de la Huerta se halla estrechamente relacionado con la progresiva desecación y acondicionamiento agrícola de vastas áreas de humedal que, desde tiempo inmemorial, se colonizaron al tiempo se iba extendiendo, por la superficie de cultivo, las infraestructuras de riego y avenamiento. Ante los escasos aportes hídricos de la zona, las prolongaciones de la red de acequias obligaron a convertir, en algunos tramos, los azarbes en canales de riego (Abellán, 2019 y Canales, 2005). Este complejo sistema no sólo permite aprovechar, de manera eficiente, las aguas de escorrentía sino también, abastece los embalses artificiales de espacios nutuales húmedos del sur de la provincia de Alicante, -como, por ejemplo, los embalses del Parque Natural de El Hondo de Elche o parajes naturales como *Los Carrizales*- (Melgarejo, 2012; Abellán, 2018).

4. CONCLUSIONES

En base a todo lo expuesto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1º.- La invasión u ocupación intensa, por el hombre, de los llanos aluviales, ramblas y barrancos -por usos agrícolas, urbanísticos e industriales-, junto al abandono progresivo del sistema tradicional de riego y a una inadecuada coordinación en la ejecución de los trabajos de mantenimiento del sistema de riegos, constituyen los principales factores de riesgo que participan en las inundaciones en el territorio de la Cuenca del Segura, por crecida de los cauces fluviales a consecuencia de episodios de lluvias intensas o torrenciales. La solución a estos problemas radica en la protección conjunta del espacio agrícola (Huerta) y del sistema tradicional de riego que permite una óptima reutilización y aprovechamiento racional de las aguas de escorrentía o avenida. Para ello es fundamental cumplir, de manera escrupulosa, las Ordenanzas de riego y endurecer las penas o sanciones a los contraventores como elemento disuasorio; medida esta última, que también debería contemplarse en la legislación –de aguas, suelo y ordenación del territorio- relativa a la prohibición de ocupación de espacios de riesgo por inundación (ramblas, llanos aluviales y ramblas).

2º.- La presencia, en la Cuenca del Segura, tanto de ríos-ramblas como la nula o escasa capacidad de desagüe del cauce -en algunos tramos anormalmente estrecho- constituye otro factor importante de

riesgo por inundación. Para acabar con este grave problema se plantean una serie de actuaciones como la construcción de presas y la apertura de canalizaciones practicada sobre el curso del Segura con el fin de ampliar la capacidad de desagüe.

3º.- La ejecución de obras de defensa frente a avenidas, en lugares estratégicos de la Cuenca del Segura, (presas, embalses, canales de derivación y drenaje, entre otras infraestructuras) en particular, la proyección y ejecución de "Infraestructuras Verdes" que garanticen el aprovechamiento de las aguas sobrantes y el abastecimiento sostenible de espacios húmedos protegidos, constituye otra importante medida o acción preventiva para reducir los efectos derivados de las inundaciones en esta área del sureste peninsular por crecida de los ríos a causa de las lluvias torrenciales. Por otro lado, se ha de tener en consideración que la densa red de avenamiento que jalona la Huerta del Bajo Segura, además de recoger las aguas sobrantes de los riegos y aportar nuevos débitos para la expansión del regadío en la zona antes el conducirlas hasta el mar, (como ocurre, por ejemplo, con las filtraciones del sector regado de *Los Carrizales*), cumple también una importante función en el abastecimiento y mantenimiento de espacios húmedos, garantizándose con ello un óptimo aprovechamiento de los recursos hídricos, incluido las aguas de avenida o escorrentía.

REFERENCIAS

- Abellán Contreras, F. J. (2018). La desecación, saneamiento y colonización de terrenos pantanosos. Propuesta del cardenal Belluga en la cuenca fluvial del río Segura. En: *Wasser-Wege-Wissen auf der Iberischen Halbinsel,* 179-212. Berlín, Nomos Verlagsgesellschaf.
- Abellán Contreras, F. J. (2019*). La desecación de los humedales en el sur del Reino de Valencia (ss. XVII-XX), Estudio histórico-jurídico*. Thomson Aranzadi, Navarra.
- Abellán Contreras, F.J. (2019). Gestión hídrica, protección ambiental y aprovechamiento agrario en el entorno del antiguo Sinus Illicitanus: El Hondo y los Carrizales de Elche. En: Joaquín Melgarejo Moreno (Ed.), *Congreso Nacional del Agua Orihuela: Innovación y Sostenibilidad*, 731-744. Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante.
- Bautista Martín, J. (1989). Las avenidas en la cuenca del Segura y los planes de defensa. En: Antonio Gil Olcina (Ed.), *Avenidas fluviales en inundaciones en cuenca del Mediterráneo,* 469-482. Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante.
- Calvo Gracia-Tornel, F. (1969). La huerta de Murcia y las avenidas de Guadalentín. *Papeles el Departamento de Geografía,* 1, 11-137.
- Canales Martínez, G. (2005). Avenamiento y utilización de aguas muertas. *La cultura del agua en la cuenca del Segura*, 439-478. Fundación Caja Murcia.
- Canales Martínez, G. (2016). La Gestión del agua en la huerta del Bajo Segura: Ordenanzas de riego y Derecho consuetudinario. En: *Libro jubilar en homenaje al profesor Antonio Gil Olcina*, 7-39. Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante.
- Ferreras Fernández, C. (2004). *Inundaciones y sequias en la cuenca del río Segura*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.
- Lemeunier, G. (1995). Gestión pública y gestión privada en los regadíos murcianos: la emergencia de los heredamientos (1480-1800). *Miscelánea Medieval Murciana*, 19-20, 139-152.
- López Bermúdez, F. y Gutiérrez Escudero, J. D. (1983). Descripción y experiencias en la avenida e inundaciones de octubre de 1982 en la cuenca del Segura, *Estudios Geográficos*, 170-171, 87-120.
- Martínez Almira, M. M. (2015). El agua, derecho de uso y utilidad en el regadío de tradición andalusí del Reino de Valencia. *Glossae: European Journal of Legal History,* 12, 483-520.
- Martínez Almira, M. M. (2018). El valor de la tradición jurídica andalusí en el régimen de aguas. Consenso y acuerdos del pasado para el agua en el futuro*, e-legal History Review*, 27.
- Martínez Almira, M. M, Payá Seyés, J. y Abellán Contreras, F. J. (2018). Comunidad, junta y ayuntamiento en la gestión del agua. De la administración andalusí al marco jurídico institucional

real en el Levante peninsular (ss. XII-XVIII). En: *Recs històrics: pagesia, historia i patrimoni, IX congrés sobre sistemes agrari, organització social i poder local*, 499-534. Institut d´Estudis Ilerdencs.

- Martínez Martínez, M. (2010). *La cultura del agua en la Murcia medieval (ss. IX-XV).* Universidad de Murcia, Servicios de Publicaciones.
- Martínez Martínez, M. (2017). En defensa de la Huerta de Murcia: Las primeras ordenanzas del siglo XIV. *Estudios sobre el Patrimonio, Cultura y Ciencias Medievales,* 2, 975-926.
- Maurandi Guirado, A y Romero Díaz, M. A. (2000). Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo XX: actuaciones de prevención. *Serie Geográfica*, 9, 93-120.
- Melgarejo Moreno, J. y Miranda Encarnación, J. A. (2012). El patrimonio histórico natura. El valle de Ricote, el Hondo y las lagunas de Torrevieja. En: *Los bienes culturales y su aportación al desarrollo sostenible,* 221-262. Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante.
- Molina Muntó, A. (1977). Orihuela: Las Ordenanzas de Don Jerónimo Mingot. *Revista del Instituto de Estudio Alicantino Juan Gil-Albert*, 20, 61-76.
- Muñoz Bravo, J. y Toledano Sánchez, F. (2005). Prevención y defensa de riadas en la Cuenca del Segura. En: *La cultura del agua en la cuenca del Segura*, 135-167. Fundación Caja Murcia.
- Olcina Cantos, J. (2005). Precipitaciones escasas, irregulares e intensas: sequías e inundaciones. En: *La cultura del agua en la cuenca del Segura*, 91-134. Fundación Caja Murcia.
- Pérez Morales, A., (2008). Aumento del riesgo de inundación por ocupación indebida de las áreas de convergencia de aguas en el sur de la Región de Murcia. *Scripta Nova: Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales,* 270.
- Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de *Evaluación y Gestión de Riesgos de Inundación.* https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2010-11184
- Romero Díaz, A. y Maurandi Guirado, A. (2000). Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo XX. Actuaciones de prevención. *Serie Geográfica*, 20, 93-120.
- Torres Fontes, J. (1975). *El regadío murciano en la primera mitad del siglo XIV.* Junta de Hacendados de la Huerta de Murcia.
- Torres Fontes, J. (1985). Ordenaciones para la guarda de la Huerta de Murcia (1305-1347) y Ordenanzas para la guarda del campo (siglo XV). *Miscelánea Medieval Murciana,* 12, 239-274.

LAS NARRATIVAS DE LOS PLANES GUBERNAMENTALES COMO UNA ESTRATEGIA PARA LA IMPOSICIÓN DE UN NUEVO CICLO DE EXPLORACIÓN EN LA REGIÓN AMAZÓNICA: EL CASO DE LAS HIDROELÉCTRICAS EN BRASIL

Pedro Abib Hecktheuer
Profesor de Derecho Constitucional en la Facultad de Derecho de la Universidad Católica de Rondônia, FCR, Brasil
pedro@fcr.edu.br
https://orcid.org/0000-0003-1636-7176

Maria Cláudia da Silva Antunes de Souza
Profesora del Programa de Posgrado *Stricto Sensu* en Ciencia Jurídica de la Universidad del Vale de Itajaí, PPCJ, UNIVALI, Brasil
mclaudia@univali.br
https://orcid.org/0000-0002-8118-1071

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo evaluar si las narrativas de que la implementación de Centrales Hidroeléctricas son el mejor camino para el desarrollo y una fuente de energía limpia y sostenible representa una estrategia para la imposición de un nuevo ciclo de exploración de la región amazónica, caracterizado por imponer altos costes socioambientales para la región. Con este fin, se discute la resignificación que se le ha dado a los ríos y a la región amazónica en los planes del gobierno brasileño, especialmente desde la Operación Amazonía, desde la década de 1960. La Amazonía recibió especial atención del gobierno brasileño en la expansión de las fuentes hidroeléctricas en el sector energético brasileño, sin que hubiera ninguna preocupación en relación con los impactos socioambientales de tales proyectos. Las narrativas y documentos oficiales, sin demostrar veracidad, impusieron la expansión hidroeléctrica como la única forma para el desarrollo del país, lo que hizo posible la construcción de varias centrales hidroeléctricas en la Amazonía, con resultados trágicos para los pueblos y comunidades tradicionales. Para obtener tales consideraciones, se realizó una investigación bibliográfica y documental.

1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación tiene como objetivo evaluar si las narrativas de que las represas hidroeléctricas sean una fuente de energía limpia y sostenible representan una estrategia para la imposición de un nuevo ciclo de exploración de la región amazónica, con beneficios exógenos y pérdidas socioambientales locales. La región pasó por varios ciclos de ocupación y explotación, siempre con imposiciones exógenas y en detrimento de sus pueblos y comunidades tradicionales, ya sea en el período colonial, con las misiones militares e incursiones, en la política de Pombal o en los ciclos de borrador. Esta realidad, sin embargo, no parece haber sido superada. El origen del problema amazónico es eminentemente político, en su sentido más amplio. Tal problema invariablemente afecta sustancialmente a los pueblos y comunidades tradicionales y su sostenibilidad.

Con base en eso, el problema de la investigación reside en la siguiente pregunta: ¿son las narrativas encontrada en los planes del gobierno brasileño, que presentan los proyectos hidroeléctricos como

una fuente limpia y sostenible, una forma de dirigir el sector energético brasileño a la región amazónica, independientemente de los desafíos socioambientales, o efectivamente corresponde a la realidad de los proyectos implementados en la Amazonía? Como hipótesis, se tiene la intuición de que las narrativas y discursos gubernamentales son una estrategia para imponer intereses exógenos, una vez que los proyectos hidroeléctricos llevados a cabo en la región amazónica significan graves daños socioambientales, representando poco o casi ningún beneficio para los pueblos y comunidades tradicionales de la Amazonía. Para poder resolver el problema, se realizó una investigación bibliográfica y documental. Además, en las diversas fases de la investigación, se utilizaron las técnicas del referente, de la categoría y del concepto operativo (Pasold, 2015).

2. LA RESIGNIFICACIÓN DE LOS RÍOS Y LAS AGUAS AMAZÓNICAS EN BRASIL

La percepción de que el agua es inagotable y que es un elemento abundante, representó una fuerte influencia en la formación socioeconómica brasileña, especialmente en la Amazonía. Como la región amazónica se caracteriza por una infinidad de cuerpos de agua y de las más amplias dimensiones, tanto en los libros como en los discursos oficiales, informes y planes gubernamentales, esta percepción con un cierto sobredimensionamiento están presentes. Siempre hubo una fuerte interacción entre los ríos y las sociedades humanas que han vivido en la región durante siglos. El río Amazonas y sus afluentes siempre han sido estratégicos en términos de observación y movimiento de personas y bienes, además de haber sido el camino que condujo a la región. Durante mucho tiempo, la historiografía amazónica entendía a sus ríos como un lugar de "tráfico de personas, productos, cultura civilizadora o como un lugar de referencia para las poblaciones nativas, pueblos y ciudades, siempre como una ruta acuática" (Batista, 2019, p. 122).

Por otro lado, desde una perspectiva histórico-ambiental, las producciones historiográficas sobre la Amazonía, actualmente, han problematizado las aguas al abordar las dinámicas socioeconómicas, políticas, culturales y ambientales que se llevan a cabo en sus márgenes y en su curso. Las aguas de los ríos amazónicos ahora han ganado una perspectiva comercial. Los sentidos y los significados que les fueron atribuidos por sus poblaciones tradicionales ya no son los mismos. Los procesos de ocupación y reocupación de la Amazonía tienen una base sólida en sus ríos. En el más reciente, las aguas amazónicas fueron "resignificadas en kilovatios y mercancías, poniendo en un segundo plano las relaciones mantenidas por las comunidades/pueblos con los ríos" (Batista, 2019, p. 117). Esto se debió a los grandes proyectos minero-metalúrgicos e hidroeléctricos que se han desarrollado desde hace algunas décadas, que han dado centralidad a los ríos de la región, sirviendo, ahora, como una fuerza impulsora para las operaciones industriales y urbanas en el país.

Esta perspectiva de convertir las aguas de los ríos en bienes y capital se ha convertido en parte del pensamiento de los gobiernos brasileños al formular sus planes de desarrollo a lo largo del siglo XX. Entre los años 30 y 60, la energía hidroeléctrica brasileña pasó de 615 a 3,642.0 megavatios (MW), todavía restringida a la exploración energética de los ríos que estaban cerca de los grandes centros industriales del país. Con el agotamiento de estas fuentes cercanas, más tarde se comenzaron a buscar otras cuencas hidrográficas (Batista, 2019, p. 126). En particular, la matriz energética brasileña tuvo una fuerte inclinación hacia la energía hidroeléctrica a partir del comienzo de la segunda mitad del siglo XX, cuando comenzó la búsqueda del potencial de los recursos naturales y la posibilidad de su explotación, para eso fueron realizados levantamientos técnicos y planes de desarrollo para el país.

Naturalmente, los documentos gubernamentales pasaron a señalar el potencial energético que tenían los ríos en la región amazónica, después de haber realizado un mapeo de los lugares que podrían presentar el mejor costo-beneficio para tales implementaciones. El gran potencial de la región se debe a las enormes cantidades de agua que la atraviesan y a las importantes caídas topográficas que tienen los afluentes del río Amazonas (Fearnside, 2015, p. 12).

El primer hito legal de este cambio de ojos hacia el potencial energético de los ríos amazónicos ocurrió en el Plan de Valorización Económica de la Amazonía, previsto en la Constitución Federal de 1946. Este plan definió como su objetivo el de "establecer una política energética en la región bajo bases económicas" (Brasil, 1953), contemplando la electrificación de los principales centros de producción e industria. Esa idea se empezó a realizar con lo que se denominó de "Operación Amazonía" (Brasil, 1968), en la segunda mitad de la década de 1960. Esta operación significaba un plan de desarrollo regional, que buscó reformular la política económica de la Amazonía, a través de polos de desarrollo que, al privilegiar los incentivos financieros y fiscales para ciertos sectores, buscó atraer la población y "ocupar espacios vacíos" (Nahum, 2011, p. 18).

Para hacer esto posible, se realizaron inversiones en infraestructura básica, como carreteras y electricidad. Por lo tanto, el nuevo conjunto de políticas federales para el desarrollo de la Amazonía tenía, entre sus objetivos, la expansión sistemática del sistema de generación de energía existente en el país. Además de todas las estructuras institucionales y organizativas desarrolladas para llevar a cabo estos planes de desarrollo para la Amazonía, en 1968 se creó el Comité Coordinador de Estudios Energéticos de la Amazonía (ENERAM), que estaba vinculado al Ministerio de Minas y Energía. (MMA) (Brasil, 1968).

Su creación tuvo como objetivo, entre otros, llevar a cabo la supervisión de estudios relacionados al aprovechamiento del potencial “hidroeléctrico para suministrar los sistemas eléctricos que ya existen o que serían implementados en áreas prioritarias y polos de desarrollo creados en la Amazonía por el Gobierno Federal" (Brasil, 1968b).[1]

Algunos años después, con la previsión de los polos de desarrollo de la Amazonía (Polo Amazonia), en el Plan de Desarrollo del gobierno de Geisel (Brasil, 1976), se comenzó a privilegiar proyectos a gran escala, intensivos en capital y dirigidos, entre otros sectores, a la producción de energía.

A pesar de que el potencial de producción de energía en la región amazónica se había previsto en los planteamientos de Primer Plan Quinquenal de la Superintendencia del Plan de Valorización Económica de la Amazonia (SPVEA), en 1955, fue solo a partir de la década de 1970 que las "condiciones económicas para su la utilización efectiva se materializó" (Batista, 2019, 127). Dada la importancia del sector, se creó la empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE),[2] una subsidiaria de Centrais Elétricas do Brasil (ELETROBRÁS), que se estableció oficialmente en 1973 (Brasil, 1961; 1972; 173), lo que representa un hito importante para el gobierno federal en la gestión del agua como recurso hídrico en la Amazonía. Su objetivo era realizar estudios, proyectos, construcción y operación de sistemas hidroeléctricos y de transmisión, coordinando programas en el sector eléctrico en la Amazonía (Batista, 2019, p. 127).

Los planes iniciales para el sector energético en la región amazónica comprendían docenas de represas grandes y pequeñas, aprovechando el potencial para generar energía de los afluentes del río Amazonas. La construcción de 79 centrales hidroeléctricas en la Amazonía brasileña (Figura 1) estaba

[1] Art. 2º. Compete ao Comitê: a) supervisionar os estudos visando a investigação das possibilidades de aproveitamento hidelétrico para o suprimento de sistemas elétricos já existentes ou que venham a ser implantados em áreas prioritárias e pólos de desenvolvimento criados na Amazônia pelo Govêrno Federal. b) Preparar, dentro das diponibilidades financeiras, o orçamento e aprovar o cronograma trimestral das depesas a serem efetuadas, indicando as fontes supridoras dos recursos; c) Aprovar e autorizar despesas; d) Deliberar sôbre as soluções técnicas apresentadas pelos consultores, recomendando novos estudos, se julgar conveniente; e) Propor ao Ministro de Estado as providências que considerar necessárias à execução de seus serviços; f) Apresentar às entidades financiadoras, relatórios comprovações de despesas, e outros documentos.

[2] Eletronorte inicialmente cubria los estados de Amazonas, Pará, Acre, Mato Grosso y Goiás, así como los territorios de Amapá, Roraima y Rondônia. Posteriormente se expandió, incluyendo Maranhão y el resto del estado de Mato Grosso.

prevista, a través del Plan Nacional de Electricidad, en 1987 (Brasil, 1987). En ese momento, había un potencial estimado de alrededor de 100 mil MW de generación de energía en la Amazonía (Junk & Mello, 1987, p. 126).



Figura 1. Mapa del aprovechamiento hidroeléctrico en las cuencas del Amazonas y Tocantins/Araguaia en la década de 1980. Fuente: Fearnside, 2015, p. 13.[3]

En el plan gubernamental (Brasil, 1987), el Amazonas representaba, efectivamente, un espacio privilegiado para la expansión de la matriz eléctrica del país. Para el gobierno federal, en este plan, la mayor parte del potencial hidroeléctrico no utilizado en el país se encontraba en la Amazonía. Enfatizaba, aún, que la generación de energía en la Amazonía podría transportarse a costes competitivos a las regiones noreste y sureste. También se predijo que la fuente básica para la generación de electricidad en el país seguiría siendo hidroeléctrica, hasta 2010. En ese momento, la fuente hidráulica ya representaba el 90% de la potencia instalada total del país (Brasil, 1987).[4]

Las dificultades financieras enfrentadas después del período de los gobiernos militares obligaron el país a posponer repetidamente los planes para construir represas, aunque no se pasó por alto la escala planificada. La inundación que generarían todas estas construcciones planificadas alcanzaría los 10

[3] Represas: 1. São Gabriel (2.000 MW); 2. Santa Isabel-Uaupés/Negro: (2.000 MW); 3. Caracaraí-Mucajaí (1.000 MW); 4. Maracá (500 MW); 5. Surumu (100 MW); 6. Bacarão (200 MW); 7. Santo Antônio [Cotingo] (200 MW); 8. Endimari (200 MW); 9. Madeira/Caripiana (3800 MW); 10. Samuel (200 MW); 11. Tabajara-JP-3 (400 MW); 12. Jaru-JP-16 (300 MW); 13. Ji-Paraná-JP-28 (100 MW); 14. Preto RV-6 (300 MW); 15. Muiraquitã RV-27 (200 MW); 16. Roosevelt RV-38 (100 MW); 17. Vila do Carmo AN-26 (700 MW); 18. Jacaretinga AN-18 (200 MW); 19. Aripuanã AN-26 (300 MW); 20. Umiris SR-6 (100 MW); 21. Itaituba (13.000 MW) 22. Barra São Manuel (6.000 MW); 23. Santo Augusto (2.000 MW); 24. Barra do Madeira [Juruena] (1000 MW); 25. Barra do Apiacás (2000 MW); 26. Talama [Novo Horizonte] (1.000 MW); 27. Curuá-Una (100 MW); 28. Belo Monte [Cararaô] (8.400 MW) 29. Babaquara (6.300 MW); 30. Ipixuna (2.300 MW); 31. Kokraimoro (1.900 MW); 32. Jarina (600 MW); 33. Iriri (900 MW); 34. Balbina (250 MW); 35. Fumaça (100 MW); 36. Onça (300 MW); 37. Katuema (300 MW); 38. Nhamundá/Mapuera (200 MW); 39. Cachoeira Porteira (1.400 MW); 40. Tajá (300 MW); 41. María José (200 MW); 42. Treze Quedas (200 MW); 43. Carona (300 MW); 44. Carapanã (600 MW); 150 Mel (500 MW); 46. Armazém (400 MW); 47. Paciência (300 MW); 48. Curuá (100 MW); 49. Maecuru (100 MW); 50. Paru III (200 MW); 51. Paru II (200 MW); 52. Paru I (100 MW); 53. Jari IV (300 MW); 54. Jari III (500 MW); 55. Jari II (200 MW); 56. Jari I (100 MW); 57. F. Gomes (100 MW); 58. Paredão (200 MW); 59. Caldeirão (200 MW); 60. Arrependido (200 MW); 61. Santo Antônio [Araguari] (100 MW); 62. Tucuruí (6.600 MW); 63. Marabá (3.900 MW); 64. Santo Antônio [Tocantins] (1.400 MW); 65. Carolina (1.200 MW); 66. Lajeado (800 MW); 67. Ipueiras (500 MW); 68. São Félix (1.200 MW); 69. Sono II (200 MW); 70. Sono I (100 MW); 71. Balsas I (100 MW); 72. Itacaiúnas II (200 MW); 73. Itacaiúnas I (100 MW); 74. Santa Isabel (Araguaia) (2200 MW); 75. Barra do Caiapó (200 MW); 76. Torixoréu (200 MW); 77. Barra do Peixe (300 MW); 78. Couto de Magalhães (200 MW); 79. Noidori (100 W).

[4] Ver: "3.1.2. O aproveitamento do potencial hidrelétrico da Amazônia", "5. Expansão ao longo prazo do sistema elétrico", e "6. Expansão a médio prazo do sistema elétrico".

millones de hectáreas, aproximadamente el 2% de la región de la Amazonía legal, o el 3% de toda la porción brasileña de la selva amazónica (Fearnside, 2015, p. 13).

El crecimiento de la matriz hidroeléctrica planificada para la región amazónica continuó en los planes para las siguientes décadas. Esto se debe a que las acciones propuestas por los planes y programas gubernamentales de Fernando Henrique Cardoso, Luiz Inácio Lula da Silva, Dilma Rousseff y Jair Bolsonaro, mantuvieron la misma postura en el sentido de implementar megaproyectos hidroeléctricos en la región.

Desde el Plan 2010, ha habido un conjunto de Planes Plurianuales (PPA) - prevén inversiones del gobierno federal por períodos de cuatro años - importantes para el sector energético brasileño, entre los cuales: Brasil em Ação (Brasil, 1996), Avança Brasil (Brasil, 2000), PPA (Brasil, 2003), Programa de Aceleración del Crecimiento (PAC) (Brasil, 2008) y Programa de aceleración del crecimiento - 2 (PAC-2) (Brasil, 2012). Además de otros pronósticos, un aspecto muy relevante de estos planes, y que es importante para los propósitos de este artículo, es el de las grandes obras hidroeléctricas planificadas,[5] muchas de ellas ya ejecutadas, para la Amazonía.

Muchos pronósticos de los primeros planes hidroeléctricos para la Amazonía, por varias razones, en particular debido a limitaciones/resistencia económica o política, no se materializaron. Durante mucho tiempo, tales proyectos estuvieron latentes, habiendo recientemente resurgido, en función de una situación política más favorable (Fearnside & Laurence, 2012, p. 91-92). Estas estrategias de desaparición/reaparición de proyectos en planes oficiales son características de este sector, y pueden confirmarse observando los diferentes planes gubernamentales y planes decenales de expansión de energía eléctrica,[6] como son ejemplo los complejos Belo Monte y Río Madeira.

Las plantas hidroeléctricas representan un nuevo ciclo de cambios profundos en la región amazónica. Las consecuencias de la construcción de represas hidroeléctricas en la Amazonía son devastadoras. Los impactos socioambientales causados por ellos son demasiado significativos. Sin embargo, estos - los impactos socioambientales - no eran una preocupación del gobierno brasileño (Carvalho, 2001, p. 18). En el período en que comenzó la política energética para la Amazonía, no había ningún control con respecto a los impactos que tales proyectos generarían, lo importante era, exclusivamente, la producción de energía y el supuesto desarrollo nacional.

Los primeros grandes proyectos hidroeléctricos en la región fueron: Coaracy-Nunes, Curuá-Uma, Tucuruí, Balbina, Mansa y Samuel. Sin excepción, son proyectos cuestionados por la comunidad nacional e internacional, con respecto a sus impactos socioambientales, hasta el día de hoy (Garcia, 2004). Los impactos socioambientales, se reitera, no eran parte de las preocupaciones del gobierno. Cabe señalar que, en esta fase inicial, hubo una relación y asociación íntima entre los proyectos hidroeléctricos y el desarrollo del sector mineral en la Amazonía. La Hidroeléctrica Coaracy Nunes, por ejemplo, tuvo una asociación directa con la explotación de manganeso en el territorio de Amapá; La de Cachoeira Porteira estaba relacionada con la explotación de la bauxita; La de Samuel, en Rondônia, fue motivado por la explotación de casiterita en la región, entre otros (Batista, 2019, p. 127). Posteriormente, esta relación dejó de existir.

Como se mencionó, la expansión energética en la Amazonía fue perenne en los planes gubernamentales, independientemente del sesgo político-ideológico de cada gobierno. No al ritmo o

[5] Los detalles sobre las obras en el sector energético se detallan en los Planes Decenales de Expansión de Energía, y no directamente en los Planes Plurianuales, que son planes más amplios que traen las pautas de inversión, pero sin detalles.
[6] Los planes decenales de expansión de energía son documentos informativos, emitidos por la Empresa de Investigación Energética (EPE) del Ministerio de Minas y Energía (MME), dirigidos a la sociedad, en los que se presentan las indicaciones y perspectivas del gobierno para la futura expansión del sector energético por períodos de diez años.

en las cantidades que se planeaban, pero los proyectos hidroeléctricos han sido aprobados, ejecutados e implementados por todos los gobiernos en las últimas décadas. Ya son más de 20 plantas hidroeléctricas en operación en la región Amazónica (Tabla 1).

La realidad amazónica comenzó a reconfigurarse con la presencia de estas innumerables centrales hidroeléctricas (Figura 2), y es posible confirmar, al observar la tabla, aquella opción hecha por el gobierno brasileño en la "Operación Amazonía", aún en los años 60. Además de los proyectos hidroeléctricos ya implementados, con respecto a la expansión energética en la región, los planes del gobierno prevén una serie de nuevos proyectos hidroeléctricos. Al realizar el análisis de los últimos 12 planes decenales de expansión energética de Brasil[7] se puede observar una gran lista de represas hidroeléctricas para que se implementen en la Amazonía. Hay más de 43 indicaciones de plantas hidroeléctricas para la región amazónica por parte del gobierno federal (Tabla 2). Muchos de ellos, es cierto, ya no están presentes en los planes más recientes.

Año	Nombre	Estado	Río	Capacidad (MW)
1975	Coaracy-Nunes	Amapá	Araguari	298
1977	Curuá-Uma	Pará	Curuá-Uma	100
1984	Tucuruí	Pará	Tocantins	8370
1987	Balbina	Amazonas	Uatumá	250
1987	Manso	Mato Grosso	Manso	212
1988	Samuel	Rondônia	Jamari	210
1999	Lajeado	Tocantins	Tocantins	800
2006	Peixe Angical	Tocantins	Tocantins	452
2009	São Salvador	Tocantins	Tocantins	243.2
2011	Dardanelos	Mato Grosso	Aripuanã	261
2011	Santo Antônio	Rondônia	Madeira	3568
2011	Rondon II	Rondônia	Comemoração	73.5
2012	Estreito (Tocantins)	Maranhão/Tocantins	Tocantins	1087
2013	Jirau	Rondônia	Madeira	3750
2014	Santo Antônio do Jari	Pará/Amapá	Jari	373
2014	Sinop	Mato Grosso	Teles Pires	401.88
2014	São Manoel	Pará/Mato Grosso	Teles Pires	700
2014	Ferreira Gomes	Amapá	Araguari	252
2015	Teles Pires	Pará/Mato Grosso	Teles Pires	1820
2016	Complexo Apaiacás	Mato Grosso	Teles Pires	102
2016	Cachoeira Caldeirão	Amapá	Araguari	219
2018	Colider	Mato Grosso	Teles Pires	300
2019	Belo Monte	Pará	Xingu	11.233

Tabla 1. Plantas hidroeléctricas en la Amazonía Legal brasileña con más de 30 MW de capacidad instalada (1975-2019). Fuente: elaboración propria.[8]

[7] Los planes decenales de expansión de energía son documentos informativos, emitidos por la Empresa de Investigación Energética (EPE) del Ministerio de Minas y Energía (MME), dirigidos a la sociedad, en los que se presentan las indicaciones y perspectivas del gobierno para la futura expansión del sector energético por períodos de diez años.

[8] Además de los trabajos/producciones científicas sobre el tema, la realización de esta tabla analizó los diversos planes decenales de expansión de energía. A través de las indicaciones de los planes, se realizó una investigación en internet para confirmar si las represas ya habían sido finalizadas y puestas en funcionamiento. Cabe señalar que solo se encontró una investigación en donde aparecen todas las represas existentes en la Amazonía Legal brasileña, pero solo hasta el año 2013 (FEARNSIDE, 2015, p. 13), sin previsiones del período posterior. Por lo tanto, la tabla es el resultado de una serie

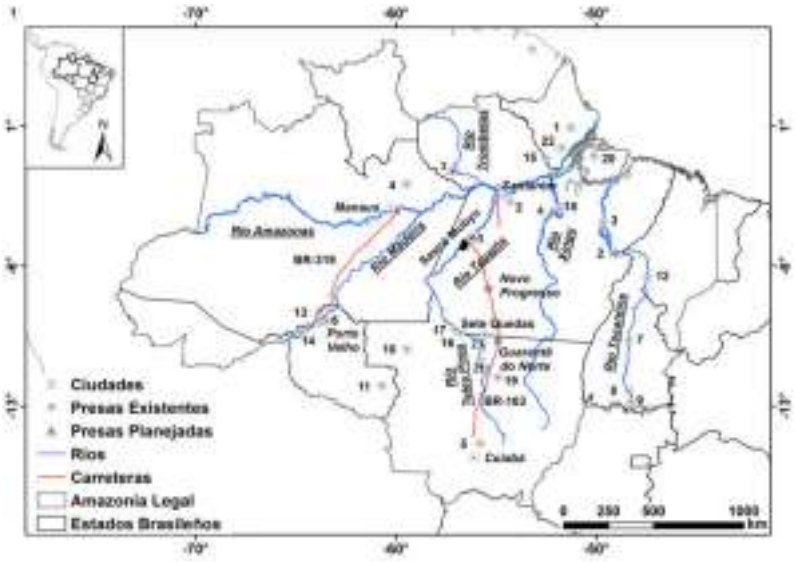


Figura 2. Represas hidroeléctricas[9] en la región de la Amazonía legal de Brasil.
Fuente: adaptación de Fearnside (2019, p. 125).

Además de estos diversos proyectos indicados en los planes analizados (Tabla 2), Fearnside (2015, p. 15) afirma que hay varias otras represas no inventariadas, "como las 62 represas adicionales que se incluyeron en el Plan 2010". Muchos de estos que se han enumerado en esta tabla ya se encuentran en etapas avanzadas de estudio e implementación.

Un aspecto muy importante en el proceso de toma de decisiones para comenzar nuevos proyectos es sobre los impactos sociales y ambientales de estas represas en la región. No se puede subestimar tales impactos y, por otro lado, tampoco se puede sobreestimar o considerar solo los beneficios, como viene siendo la práctica tanto en las narrativas gubernamentales como de las empresas constructoras. Las poblaciones locales a menudo reciben los principales impactos, mientras que las recompensas benefician en gran medida a centros urbanos distantes (Fearnside, 2015, p. 14).

Previsión de Entrada en Operación Año	Proyecto	Capacidad (MW)	Fuente
Indefinido	UHE Babaquara (Altamira)	6140	Fearnside, 2006
Indefinido	UHE Santa Isabel	1080	Fearnside, 2015
Indefinido	UHE Paiaguá	35.2	Brasil, 2006
Indefinido	UHE Taricoejo	76	
Indefinido	UHE Tupirantins	620	
Indefinido	UHE Uruçui	164	
Indefinido	UHE Cachoeira do Caracol	32,6	Brasil, 2007
Indefinido	Cachoeira do Meio	44,9	

de análisis y búsquedas, de manera que es posible que existan plantas hidroeléctricas que ya estén en funcionamiento y no se haya identificado en esta investigación.

[9] Las Centrales Hidrelétricas existentes son: 1 Coarcy-Nunes, 2 Curuá-Una, 3 Tucuruí, 4 Balbina, 5 Manso, 6 Samuel, 7 Lajeado, 8 Peixe Angelical, 9 São Salvador, 10 Dardonelos, 11 Rondon II, 12 Estreito, 13 Santo Antônio [Río Madeira], 14 Jirau, 15 Santo Antônio [Río Jari], 16 Teles Pires, 17 São Manoel, 18 Belo Monte, 19 Sinop, 20 Ferreira Gomes, 21 Colider, 22 Cachoeira Caldeirão, 23 Complexo Apaiacás. Algumas hidrelétricas planejadas: 1 Cachoeira Porteira, 2 Marabá, 3 São Luiz do Tapajós, 4 Babaquara/Altamira.

Previsión de Entrada en Operación Año	Proyecto	Capacidad (MW)	Fuente
Indefinido	Cachoeira Fortaleza	50,8	
Indefinido	Cachoeira São José	36	
Indefinido	UHE Tocantins Renascer	480	
Indefinido	UHE Magessi	53	
Indefinido	UHE Paraná	95	
Indefinido	UHE Pau D'Arco	64	
Indefinido	UHE Barra da Palma	58	
Indefinido	UHE Berimbau	26	
Indefinido	UHE Brejão	75	
Indefinido	UHE Cachoeirão	64	
Indefinido	UHE Couto Magalhães	150	Brasil, 2008
Indefinido	UHE Ipueiras	480	
Indefinido	UHE Jardim de Ouro	227	
Indefinido	UHE Juruena	46	
Indefinido	UHE Mocotó	95	
Indefinido	UHE Jutuarama	66	
Indefinido	UHE Novo Acordo	160	
2019	UHE Cachoeira dos Patos	528	
2019	UHE Marabá	2160	
2020	UHE Jamanxim	881	Brasil, 2011
2020	UHE Cachoeira do Caí	802	
2020	UHE Serra Quebrada	1328	
2020	UHE Agua Limpa	380	
2022	UHE Salto Augusto Baixo	1461	Brasil, 2013
2022	UHE São Simão Alto	3509	
2022	UHE Arraias	70	
2022	UHE Prainha	796	Brasil, 2014
2023	UHE Paredão A	199	
2023	UHE Torixoréu	408	
2021	UHE São Luiz do Tapajós	6133	Brasil, 2015
2026	UHE Castanheira	140	
2027	UHE Tabajara	400	
2028	UHE Bem Querer	650	Brasil, 2020
DESPUES DE 2029	UHE Jatobá	1650	
DESPUES DE 2029	UHE Paranã	90	

Tabla 2. Proyectos hidroeléctricos para la Amazonía Legal previstos en los Planes Gubernamentales.[10] Fuente: elaboración propia.

[10] Esta tabla se realizó a partir del análisis detallado de trabajos científicos (FEARNSIDE, 2015; 2019) y, principalmente, del análisis de los últimos 12 planes decenales de expansión energética, emitidos por el Ministerio de Minas y Energía. Cabe señalar, sin embargo, que era necesaria una comparación entre los diferentes planes, esto se debe a que muchas indicaciones de plantas hidroeléctricas no ejecutadas se repiten en planes posteriores y otras, sin embargo, no se mencionan. Se decidió, por lo tanto, presentar las indicaciones de proyectos hidroeléctricos de manera decreciente, es decir, todas las plantas hidroeléctricas previstas en los planes más recientes se incluyeron en la tabla, posteriormente fueron incluidas las previstas en los planes más antiguos que no tuvieron secuencia en el más recientes, como forma de

No hay forma de afirmar los porqués, pero el hecho es que, para complicar aún más la situación, la franja donde se encuentran los lugares más favorables para la construcción de represas hidroeléctricas, también son los que tienen la mayor concentración de pueblos indígenas en la Amazonía (Fearnside, 2015, p. 13). Es importante, con el propósito de aclarar este problema, comprender de manera más amplia cuáles son los impactos directos que sufren los pueblos y las comunidades tradicionales en las experiencias hidroeléctricas de la región.

Desde las primeras implementaciones de proyectos hidroeléctricos en la Amazonía, como ya se mencionó, la mayoría de los costes cayeron sobre el medio ambiente, incluido en ello los pueblos y las comunidades tradicionales.

Con la naturaleza, los pueblos y las comunidades tradicionales de Amazonía interactúan de manera sostenible, porque es allí donde encuentran su razón de vivir, es allí donde experimentan sus culturas, por lo que es ello - el entorno natural, los árboles, los ríos, los animales - la vida misma de los pueblos y comunidades tradicionales. Cualquiera que sea el impacto en esta relación, significa dañar irreversiblemente su existencia.

3. LAS NARRATIVAS DE LOS PLANES GUBERNAMENTALES COMO ESTRATEGIA PARA LA EXPANSIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO BRASILEÑO: LA PERSISTENCIA DE UN PADRÓN COLONIAL IMPUESTO A LA REGIÓN

Las políticas y planes del gobierno brasileño, especialmente aquellos dirigidos a la matriz hidroeléctrica en la Amazonía, fueron guiados por la desinformación, o incluso por información incompleta, distorsionada o falsa. Las declaraciones falsas se usan como verdaderas con la intención de engañar al destinatario. En tales proyectos, la práctica y estrategia es la exaltación de los beneficios y la infravaloración de los costes sociales/humanos y ambientales. Los impactos sociales, sobre los pueblos y comunidades tradicionales, sin embargo, son muchos, algunos de ellos son: la pérdida de peces y recursos a que estas personas tenían acceso en los ríos; reasentamientos en realidades completamente diferentes de aquellas en las que tienen sus formas de vida y preservación cultural, en la relación con el río y la naturaleza, por lo tanto, generando una pérdida del estilo de vida de su gente y su forma de subsistencia; problemas de salud debido a la proliferación de insectos y metilación del mercurio, entre tantos otros impactos (Fearnside, 2019, p. 56).

Los costes ambientales, asimismo, son enormes. Los impactos en el medio ambiente implican, entre otras cosas, la emisión de gases de efecto invernadero, en particular el dióxido de carbono, que ocurre con la descomposición de los árboles muertos por la inundación; por el óxido nitroso y el metano del agua en los depósitos y también en el agua que pasa a través de turbinas y vertederos, lo que representa un importante medio de calentamiento global; además de la perdida de ecosistemas, fauna y flora (Fearnside, 2019, p. 56). Ocurre que, como ya se ha mencionado, la falta de información en los discursos oficiales sobre estas fuentes hidroeléctricas y sus impactos es muy grande. Muy poco o casi nada se dice sobre los gases de efecto invernadero emitidos por las represas, tampoco sobre los desastres sociales y humanos de estos proyectos.

Tales proyectos continúan siendo tratados, en las narrativas y documentos, como una fuente de energía "limpia", y considerados como proyectos de emisiones bajas o insignificantes. Ocurre que los estudios demuestran que los impactos sobre el calentamiento global son demasiado significativos, a punto de compararse las emisiones de represas hidroeléctricas con las emisiones de grandes capitales

poder enumerar todas las plantas hidroeléctricas ya discutidas para la Amazonía en los diversos planes para la expansión de la energía. Debido a la complejidad de los planes decenales, es posible que alguna indicación no esté en la tabla.

o incluso con fuentes de energía que utilizan combustibles fósiles. Los impactos son todavía más significativos cuando se comparan con fuentes como la eólica o la solar (Fearnside, 2019, p. 56).

No obstante, los Estudios de Impacto Ambiental[11] no lo tratan así, tampoco las narrativas gubernamentales. La opinión dominante de la gente sigue siendo de que las represas hidroeléctricas producen energía limpia, un problema repetido reiteradamente por el gobierno brasileño y las industrias hidroeléctricas y de aluminio. Dado este escenario, y aunque este no es el objeto de esta investigación, es necesario realizar algunas preguntas. Entre los cuales: ¿son las represes hidroeléctricas son la "única opción" para el sector energético brasileño?; ¿Existen formas y medidas alternativas para aumentar la eficiencia en el uso de electricidad en Brasil?; o, aún si ¿existe la posibilidad de simplemente no generar más electricidad en el país?

No se pretende enfrentar tales preguntas con profundidad. Incluso porque estas respuestas no son, por favorables que puedan ser para la construcción de plantas hidroeléctricas, esenciales y justificativas para imponer tales costes sociales y humanos a los pueblos y comunidades en la Amazonía. Sin embargo, es importante hacer comentarios sobre tales cuestiones. La narrativa de los defensores de la construcción de hidroeléctricas es siempre que las represas son el único camino para el desarrollo del país o de la región, o que es la única forma de combatir el colapso de la energía o proporcionar electricidad a aquellos que aún no han tenido acceso a ella. La repetición constante de esta información errónea ha ganado una amplia aceptación en Brasil (Fearnside, 2019, p. 56). Sin embargo, el verdadero propósito de la energía que será generada por las hidroeléctricas que se pretenden construir nunca es discutido, y eso tiene especial relevancia. Solo después de saber el propósito, se debería debatir sobre los impactos de estas obras. Pero no ocurre así.

Los proyectos de hidroeléctricas siempre ganan las disputas, esto se debe a que el discurso de que el país "necesita" más energía se ha convertido en sentido común, y en contraste con esto, solo se presentan otras opciones que, por regla general, provienen de una fuente no renovable (combustible fósil). Una vez que se pone como cierta la necesidad de que se genere más y más energía como forma de alcanzar el desarrollo, se insiste, imposibilita un debate más profundado sobre el propósito de la energía que se irá generar, y este punto es crucial en el debate sobre el sector en Brasil. Así, buena parte de la energía generada por las centrales hidroeléctricas brasileñas, desde Tucuruí hasta Belo Monte, está destinada a producir alúmina y aluminio para exportación (Pinto, 2012, p. 778-782). Esto representa una de las peores opciones posibles en términos de generación de empleo en Brasil, ya que "el procesamiento de aluminio genera 1,46 empleos por gigavatio/hora de electricidad consumida". La primera medida para pensar de manera diferente sobre el escenario hidroeléctrico brasileño sería dejar de exportar aluminio y productos electro intensivos (Fearnside, 2019, p. 57).

En la primera década del siglo XIX, la industria brasileña era responsable por consumir el 50% de la energía generada en el país, mitad de la cual se dirigía a solo seis sectores, a saber: metales no ferrosos (aluminio), metalurgia, acero (acero), papel y celulosa, cemento y petroquímicos. Al menos el 8% del consumo se "exportó incorporando electricidad a productos primarios como el aluminio, el acero y la celulosa, sectores con bajo valor agregado, que no incluyen mano de obra" (Brasil, 2003).

La colonialidad del poder (Quijano, 2009) también se revela aquí, porque los precios de estos productos exportados son determinados por los consumidores, que están en los llamados países desarrollados, que también son los que evitan establecer tales industrias en sus países. Esta realidad incorpora a Brasil, en esta perspectiva de globalización, como productor de productos con bajo valor agregado y alto consumo de energía. Los costes sociales/humanos y ambientales son todos para

[11] Estudios que la Ley brasileña exige que sean realizados por proyectos que utilizarán recursos ambientales y que tienen potencial de contaminación o degradación (Brasil 1990).

Brasil/Amazonia, y buena parte de los beneficios para los consumidores de otros países, que además de elegir no desarrollar tales industrias en su país, determinan los precios de los productos que se consumirán (Brasil, 2003). Además de infravalorar los costes ambientales y sociales, el pensamiento tradicional y los planes gubernamentales no llevan en cuenta el potencial de mejorar la eficiencia del sector energético como forma de atender a las necesidades. La eficiencia es el recurso energético más barato y seguro. El uso eficiente y el ahorro de energía cuestan mucho menos que la generación o su compra, no genera, además, contaminación ni impactos socioambientales, puede ser, aún, responsable por apoyar los multiplicadores económicos y el empleo local (Brasil, 2003).[12]

Sobre todo, la eficiencia proporciona, como mayor ventaja, el estímulo macroeconómico que proviene de la reubicación del capital, que puede alcanzar escalas multimillonarias en pocos años. Esto se debe a que las tecnologías que se pueden desarrollar localmente, como lámparas fluorescentes compactas o marcos de ventanas que bloquean el calor/frío, pueden requerir una inversión de capital hasta mil veces menor por kilovatio, mientras se mantiene la misma luz y la misma comodidad para los usuarios. Otro ejemplo para buscar la eficiencia energética en Brasil se refiere a una cuestión muy simple del día a día, el calentamiento del agua: del 5 al 10% de todo el consumo de electricidad en Brasil es para calentar agua, especialmente mediante el uso de duchas eléctricas. Brasil es uno de los pocos países del mundo que usa ducha eléctrica, y entre ellos es el que más la utiliza. Tales porcentajes exceden la capacidad de generación de energía de las mayores hidroeléctricas brasileñas (Brasil, 2003).[13]

Mientras que el consumidor invierte, en promedio, 30 reales para comprar una ducha eléctrica, el país invierte entre 2 y 3 mil reales para instalar la capacidad de generar electricidad para suministrar la ducha eléctrica, además de todos los costes ambientales, sociales y humanos de estas fuentes de generación de electricidad. Otros medios, como el calentamiento solar, como prioridad, y el gas como alternativa, reorganizarían el consumo de energía para el calentamiento del agua (Fearnside, 2019, p. 57). Al hacer este rediseño para la economía y la eficiencia energética, se podría transformar "el sector energético de un agujero negro a capital en una fuente neta de capital para financiar otras necesidades de desarrollo". Es posible emular resultados de mercado eficientes para que la solución de menor costo para el cliente sea también la más rentable para el proveedor (Brasil, 2003). Brasil es, a gran distancia, uno de los países más afortunados del mundo, porque tiene amplias alternativas a las plantas hidroeléctricas, los combustibles fósiles y la energía nuclear para satisfacer sus necesidades de electricidad, Brasil tiene "ricas reservas de megavatios inexploradas" (Brasil, 2003).

La aplicación del "principio de proporcionar servicios de energía a un costo mínimo y usar las herramientas de planificación integrada de recursos para alinear las recompensas empresariales e institucionales con los objetivos sociales a nivel nacional", podría dirigir al país hacia la superación de este paradigma en el sector y dar a los brasileños la "sociedad justa y próspera" que desea (Brasil,

[12] “Substituindo esses chuveiros por aquecedores de água solares, a gás butano ou a gás natural mais eficientes, e instalar um fusível permanente que evite a reinstalação do chuveiro elétrico economizaria dinheiro e liberaria até pelo menos 10% da capacidade de geração nacional” (Brasil, 2003).

[13] “A eficiência em termos de energia aumenta o emprego local ao criar e instalar tecnologias mais inteligentes, em vez de comprar energia de longe. A eficiência também pode beneficiar desproporcionadamente os pobres, para quem a energia absorve uma maior fração da renda disponível do que para os mais bem aquinhoados pela fortuna. Noventa por cento da iluminação residencial e metade da comercial no Brasil ainda é feita com lâmpadas incandescentes, principalmente por clientes que não podem pagar as lâmpadas eficientes, que são mais caras. Um dos principais serviços públicos dos Estados Unidos da América achou que valia a pena dar mais de um milhão de lâmpadas fluorescentes compactas de eficiência quintuplicada simplesmente para economizar em suas usinas de eletricidade existentes - sem falar no fato de evitar investimentos em novas usinas. A tecnologia eficiente em termos de energia pode também favorecer a consecução de objetivos sociais. Uma experiência em Curitiba mostrou que instalar "prateleiras de luz" baratas nas janelas de salas de aula economizava 75% de uso de eletricidade, o que permitia à escola comprar mais livros. Também, os estudantes aprendem até 26% mais rápido em salas de aula bem iluminadas com a luz do dia” (Brasil, 2003).

2003). Los pasos hacia esta mejor eficiencia energética, en el sentido de renunciar a este patrón colonial de exportaciones con uso intensivo de energía eléctrica, la promoción e incentivos para una cultura de uso adecuado de la electricidad, y la búsqueda "para aprovechar los recursos solares y eólicos, son totalmente ausente de los planes del gobierno o recibe solo una consideración simbólica". Esto se refleja en los planes de desarrollo más recientes, a ejemplo de los vetos hechos por la presidenta Dilma Rousseff, en enero de 2016, sobre las alternativas no hidroeléctricas para la producción de electricidad a gran escala en Brasil (Brasil, 2016).

4. CONCLUSIÓN

No hay forma de justificar el progreso y el desarrollo con la imposición de culturas y pueblos, ya sea por prácticas genocidas, como ocurrió durante mucho tiempo en la Amazonía, o por lo que categorizamos como etnocidio, la faceta más perversa e invisible de los proyectos hidroeléctricos implementados en la Amazonía. No existe, por lo tanto, desde un punto de vista político-filosófico, ni histórico y, claramente, ni bajo las bases de la Ley, desde la Constitución de 1988, justificación para estos megaproyectos hidroeléctricos en la Amazonía que claramente representan un daño a la sostenibilidad de sus pueblos y comunidades tradicionales.

El problema de investigación fue respondido y la hipótesis confirmada, ya que fue posible percibir que las narrativas y discursos del gobierno que afirman que las fuentes hídricas de generación de energía eléctrica serian limpias y sostenibles solo significan una estrategia para que pudieran ser aprobadas y aceptados tales proyectos en la Amazonía. Así el sector energético brasileño pudo ser direccionado a la Amazonía sin llevar en cuenta todos los costes humanos y ambientales. Habría opciones más viables para equilibrar y estabilizar el sector energético brasileño que no requieren tales impactos socioambientales en la Amazonía, sin embargo, existe una insistencia en mantener un modelo que solo realiza el análisis de los costes y beneficios a partir de una visión economicista, sin tener en cuenta los costes humanos y ambientales en esa ecuación.

REFERENCIAS

- Baitelo, R. *et al*. (2013). *[R]evolução energética:* A caminho do desenvolvimento. Greenpeace Brasil, São Paulo. http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Documentos/Revolucao-Energetica-/
- Batista, I. M. S.; Miranda, L. M. (2019). Os “Hidronegócios” nos rios da Amazônia. *Revista Brasileira de História*, 39(81), 117-139. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-01882019000200117&script=sci_arttext
- Bermann, C. (2002). *Energia no Brasil, Para que? Para quem?*: crise e alternativa para um país sustentável. Editora Livraria da Física.
- Braga, D. C. (2019). *Energia nuclear entre o paradigma da sustentabilidade e a transnacionalidade*: possibilidades jurídicas para sua expansão na matriz elétrica brasileira no terceiro milênio. Tese da Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, Santa Catarina, Brasil.
- Brasil (1946). *Constituição dos Estados Unidos do Brasil*. Rio de Janeiro: Assembleia Constituinte. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao46.htm
- Brasil (1953). *Lei n.º 1.806/1953*. Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, cria a superintendência da sua execução. Diário Oficial da União de 7/1/1953, Seção 1, p. 276. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L1806.htm
- Brasil (1969). *Decreto nº 63.952/1968*. Cria no Ministério das Minas e Energia o Comitê Coordenador dos Estudos Energéticos da Amazônia. Diário Oficial da União, Seção 1, de 6 de jan. de 1969, p. 65. https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1960-1969/decreto-63952-31-dezembro-1968-405481-publicacaooriginal-1-pe.html
- Brasil (1973). *Decreto nº 72.548/1973*. Concede autorização para funcionar como empresa de energia elétrica à Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A. - ELETRONORTE. Diário Oficial

da União, em 31/7/1973, Seção 1, p. 7.481. https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-72548-30-julho-1973-378831-publicacaooriginal-1-pe.html

- Brasil (1988). *Decreto n.º 96.652*, de 6 de setembro de 1988. Aprova o Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 - Plano 2010 -, fixa diretrizes e normas para concessão ou autorização de centrais geradoras de energia elétrica no País. Diário Oficial da União de 08/09/1988, p. 17.217.
- Brasil (1990). *Decreto nº 99.274/1990*. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União de 07/06/1990, p. 10.887. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/Antigos/D99274.htm
- Brasil (2003) *Lei n.º 10.933/2003*. Dispõe sobre o Plano Plurianual para o período 2004/2007. Diário Oficial da União de 12/08/2004, p. 1. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Lei/L10.933.htm
- Brasil (2012). *Lei n.º 12.593/2012*. Institui o Plano Plurianual da União para o período de 2012 a 2015. Diario Oficial da União de 19/01/2012, p. 1. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Lei/L12593.htm
- Brasil (1961). *Lei n.º 3.890-A/1961*. Autoriza a União a constituir a empresa Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - ELETROBRÁS. Diário de 25 de abril de 1961. https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-3890-a-25-abril-1961-353665-normaatualizada-pl.html
- Brasil (1972). *Lei n.º 5.824/1972*. Dispõe sobre empréstimo compulsório, em favor da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. ELETROBRÁS. Diário Oficial da União de 17/11/1972. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5824.htm
- Brasil (1996). *Lei n.º 9.276/1996*. Dispõe sobre o Plano Plurianual para o período de 1996/1999. Diário Oficial da União de 10/05/1996, p. 7947. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9276.htm
- Brasil (2000). *Lei n.º 9.989/2000*. Dispõe sobre o Plano Plurianual para o período de 2000/2003. Diário Oficial da União de 24/07/2000, p. 1. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9989.htm
- Brasil (2008). *Lei. N.º 11.653/2008*. Dispõe sobre o Plano Plurianual para o período 2008/2011. Diário Oficial da União de 08/04/2008, p. 5. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/l11653.htm
- Brasil (2016). *Mensagem nº 16/2016.* Comunico a Vossa Excelência que, nos termos do § 1º do art. 66 da Constituição, decidi vetar parcialmente, por inconstitucionalidade e contrariedade ao interesse público, o Projeto de Lei nº 6, de 2015-CN, que "Institui o Plano Plurianual da União para o período de 2016-2019". http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/Msg/VEP-16.htm
- Brasil (1987). Ministério das Minas e Energia – MME. *Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010.* Relatório Executivo. MME, Rio de Janeiro. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/anexo/and96652-88.pdf
- Brasil (2006). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2015*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2007). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2016*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2008). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2017*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde

- Brasil (2011). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2020*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2013). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2014). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2015). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2020). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. MME/EPE, Brasília. http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde
- Brasil (2003). Ministério do Meio Ambiente, MMA. *A eficiência é o maior, mais barato e mais seguro recurso energético do Brasil*. Portal do MMA, em 11 de agosto de 2003. https://www.mma.gov.br/informma/item/1425-a-eficiencia-e-o-maior-mais-barato-e-mais-seguro-recurso-energetico-do-brasil.html
- Brasil (1976). Superintendência da Amazônia. *II Plano de desenvolvimento da Amazônia. (1975-79)*. Divisão de Documentação, Belém.
- Carvalho, G. (2001). Histórico e Impacto das Políticas Públicas na Amazônia. In BARROS, Ana Cristina (org.). *Sustentabilidade e Democracia para as Políticas Públicas na Amazônia*. Projeto Brasil Sustentável e Democrático, FASR/IPAM, Rio de Janeiro.
- Chaves, K. A. (2019). Colonialidade, exceção-espoliação e etnocídio: o caso dos atingidos à jusante da barragem de Belo Monte. *Terra Livre*, 2(51), 120-152. http://agb.org.br/publicacoes/index.php/terralivre/article/view/1525
- Corrêa, C. G. *et al*. (1994). O processo de ocupação humana na Amazônia: considerações e perspectivas. *Bol. Museu Paraense Emilio Goeldi, Sér. Antropol*. 9 (1). https://repositorio.museu-goeldi.br/handle/mgoeldi/814
- Fearnside, P. M. (2006). Dams in the Amazon: Belo Monte and Brazil's Hydroelectric Development of the Xingu River Basin. *Environmental Management* 38(16). https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-005-0113-6
- Fearnside, P. M. (2015). *Hidrelétricas na Amazônia*: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras - Volume 2. INPA, Manaus.
- Fearnside, P. M. (2019a). *Hidrelétricas na Amazônia*: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras - Volume 3. INPA, Manaus.
- Fearnside, P. M. (2019b). Represas hidroeléctricas en la Amazonia brasileña: impactos ambientales y sociales. *Revista de Estudios Brasileños*, 6, (11), 123-138. https://revistas.usal.es/index.php/2386-4540/article/view/20024
- Fearnside, P. M. y Laurance, W. F. (2012). Infraestrutura na Amazônia: As lições dos planos plurianuais. *Caderno CRH*, 25(64), 87-98.
- Garcia, M. F. (2004). Ocupação do território e impactos ambientais: o papel dos grandes projetos de eletrificação da Amazônia. En: *II Encontro da ANNPAS*, 26-29 maio, 2004, Indaiatuva, SP. ANNPAS, São Paulo. http://www.anppas.org.br/encontro_anual/encontro2/GT/GT06/m%E1rcia_feitosa.pdf
- Junk, W. J. y Mello, J. A. S. (1987). Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. En: G. Kohlhepp y A. Schrader, *Homem e natureza na Amazônia*: Simpósio Internacional e Interdisciplinar. Associação Alemã de Pesquisas sobre a América Latina (ADLAF).

- Moreira, P. F. (2012). *Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21*: Oportunidades e Desafios. 2a ed. Brasília: Rios Internacionais. http://www.internationalrivers.org/node/7525
- Pasold, C. L. (2015). *Metodologia da pesquisa jurídica*: teoria e prática. 13 ed. Conceito Editorial, Florianópolis.
- Pinto, L. F. (2012). De Tucuruí a Belo Monte: a história avança mesmo? *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 7(3), 777-782. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1981-81222012000300010&script=sci_arttext
- Quijano, A. (2009). Colonialidade do Poder e Classificação Social. En: B. S. Santos y M. P. Meneses, *Epistemologias do Sul*. Edições Almedina, Coimbra.

ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE DAÑOS POTENCIALES SOBRE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE POR INUNDACIONES EN EL TRAMO TORO-ZAMORA

Lei Dai
China Harbour Engineering Company Ltd (Sucursal Bolivia), La Paz, Bolivia
dailei@chec.bj.cn

Manuel Romana García
ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España
manuel.romana@upm.es
https://orcid.org/0000-0003-1025-7419

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

RESUMEN

Se ha realizado una estimación económica general de los daños potenciales de las inundaciones, para diferentes periodos de retorno, sobre las infraestructuras de transporte existentes en la zona inundable del tramo del río Duero entre las localidades de Toro y Zamora. Para el análisis de la peligrosidad se han empleado las cartografías de calados y velocidades esperables para diferentes periodos de retorno, procedentes del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Para el análisis de la exposición se han empleado los mapas de infraestructuras de transporte, la clasificación de su tipología (ferrocarril convencional, ferrocarril de alta velocidad, autovía; carreteras nacional, autonómica, provincial, comarcal o vecinal; caminos, etc.) y costes unitarios. Para el análisis de la vulnerabilidad se han usado funciones de relación magnitud-daño estandarizadas a nivel internacional y otras relaciones para los costes indirectos. A partir del cruce de los tres factores del riesgo, empleando sistemas de información geográfica, se han obtenido pérdidas económicas directas potenciales en costes de reposición y reparación de 2,6 M€, 8,7 M€ y 16,5 M€ para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, respectivamente; así como cartografías detalladas de los tramos con mayores pérdidas potenciales para priorizar las actuaciones de mitigación del riesgo.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación económica de los daños potenciales debidos a inundaciones de diseño para diferentes periodos de retorno o probabilidad de ocurrencia, es un estudio básico en cualquier análisis económico de las inundaciones en un territorio. Supone un paso previo para los análisis coste-beneficio de las medidas de mitigación y la priorización de las políticas de gestión del riesgo.

Existen muy diferentes estrategias de estimación económica de daños potenciales, según se pretenda analizar los daños totales, sólo los daños directos o indirectos; incluir los costes financieros o no; y en función de la escala de trabajo y disponibilidad de información, desde ámbito global (p.e., Arnell and Gosling, 2014), continental, nacional o regional (p.e., Paprotny *et al.*, 2020), a estudios locales (p.e., Garrote *et al.*, 2016) o incluso de un único edificio (p.e., De Mora y Díez-Herrero, 2008).

Las diversas metodologías de estimación económica de daños por inundaciones (ver recopilación en Merz *et al.*, 2010), pueden agruparse en dos aproximaciones: i) análisis de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, para posteriormente integrar los tres factores del riesgo (Garrote *et al.*, 2016); ii) aproximaciones estadísticas empleando, por ejemplo, redes bayesianas a partir de encuestas y cuestionarios de daños post-desastre (Paprotny *et al.*, 2020).

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Zamora (comunidad autónoma de Castilla y León), ubicada en el centro-noroeste de la península Ibérica. Concretamente en el tramo de río Duero comprendido entre las ciudades de Toro y Zamora (capital de la provincia homónima), con una longitud aproximada de 37 km, medidos sobre el cauce del río Duero (Fig. 1).

En este tramo de estudio, la zona inundable delimitada por el territorio anegable por la avenida de 500 años de periodo de retorno, según el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI; MITECO, Gobierno de España) comprende no sólo el cauce y las márgenes del río Duero, sino buena parte de la llanura de inundación y las vegas bajas (terrazas inferiores). En estas zonas existen múltiples infraestructuras de transporte en las áreas inundables para los diferentes periodos de retorno, tanto de la red vial de transporte terrestre rodado (autovías, carreteras nacionales, autonómicas, provinciales, comarcales y vecinales, caminos…), ferrocarril (tren de ancho de vía convencional, tren de alta velocidad) e incluso infraestructuras de transporte aéreo (helipuerto).

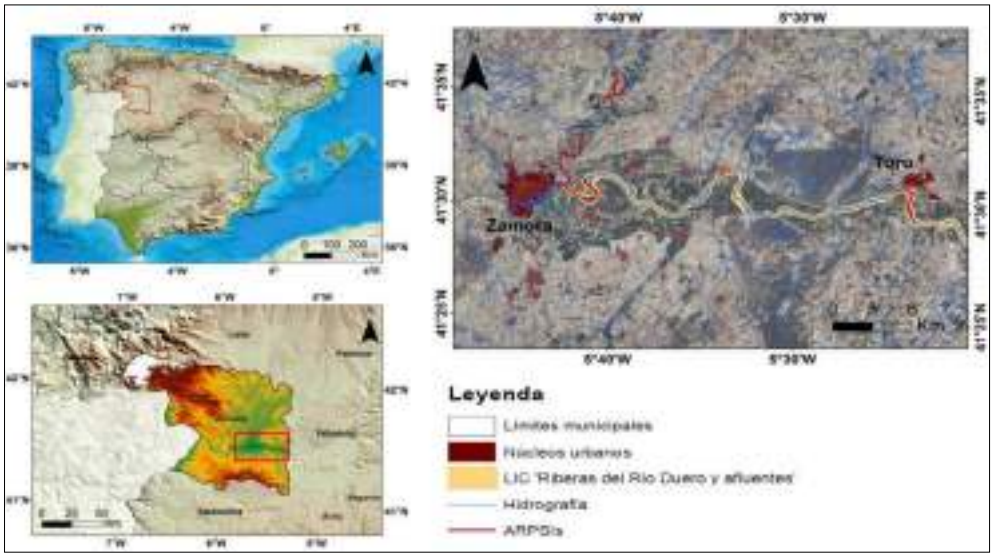


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio. Fuente: proyecto DRAINAGE.

Dentro de este tramo del río Duero en la zona de estudio se encuentra el área con riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI) denominada "Bajo Duero", cuya extensión comprende cuatro subtramos: Toro, Fresno de la Ribera, confluencia con el Valderaduey y Zamora; que aún no cuentan con planes de gestión de riesgos de inundación (PGRI) elaborados (Confederación Hidrográfica del Duero, 2016).

3. METODOLOGÍA

La estimación de daños potenciales sobre las infraestructuras por inundación en el tramo Toro-Zamora se realizará por la clásica metodología de análisis de los componentes del riesgo (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad) y su posterior integración (Fig. 2).

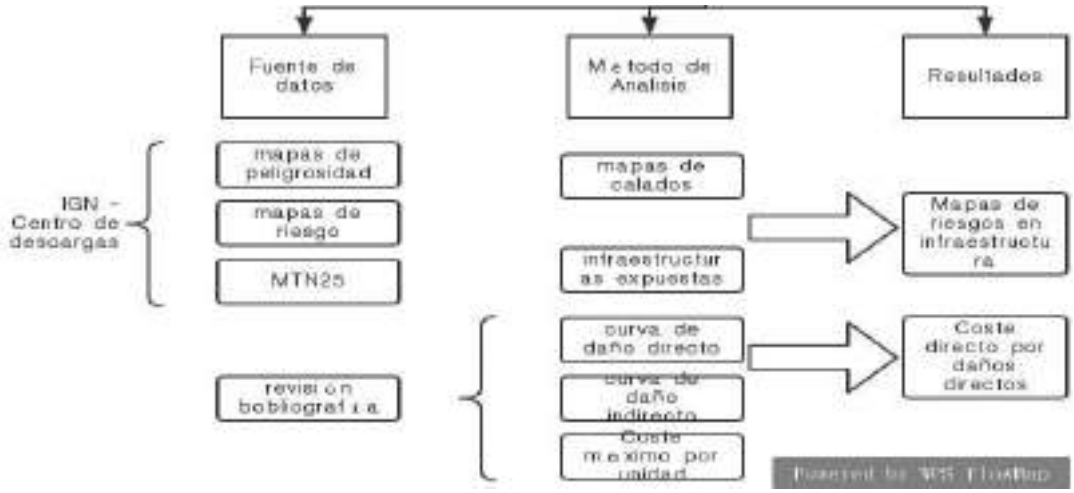


Figura 2. Esquema de metodológico general del estudio, desde las fuentes de datos a los resultados, pasando por los métodos de análisis.

Las fuentes de datos para el análisis de la peligrosidad fueron los mapas de zonas inundables y las coberturas de calados y velocidades para diferentes periodos de retorno (10, 100 y 500 años) del SNCZI; que están disponibles en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La exposición se analizó a partir de las coberturas oficiales de las infraestructuras de transporte disponibles igualmente en el Centro de Descargas del IGN (Mapas vectoriales y Bases cartográficas y topográficas); posteriormente categorizadas según la tipología de infraestructura de transporte (autovía, carretera nacional, ferrocarril convencional, ferrocarril AVE…) y sus características (anchura, disposición del firme sobre rasante, en trinchera, en talud único, etc.); y se recopiló información sobre los costes unitarios (lineales) de construcción, reparación o reposición, según las tipologías y disposiciones. Para analizar la vulnerabilidad se consultó diversa bibliografía técnica sobre funciones magnitud-daño (calado - % daño; calado+velocidad - % daño) para infraestructuras de transporte, casi toda ella del ámbito internacional; entre las que se seleccionó la función que mejor se ajustaba a las particularidades de la zona de estudio y la disponibilidad de información.

Toda la información cartográfica se almacenó, manipuló y analizó mediante un sistema de información geográfica utilizando el *software ArcGIS* (ESRI Geosystems), y sus herramientas y funcionalidades de análisis espacial.

3.1. Metodologías de análisis de la exposición: superficie de las carreteras

Una sección tipo de una carretera se puede dividir en tres partes: carriles, arcenes e intermedias. En los mapas de la zona de estudio extraídos del Centro de Descargas del IGN se categorizan las carreteras por el número de carriles de cada tramo. Pero en los mapas solo existen carreteras con solo un carril y carreteras con dos carriles. A partir de la consulta de las características geométricas del Manual de criterios del Ministerio de Fomento (2009) se ha determinado el empleo de estos valores para las anchuras con las que calcular la superficie expuesta a la inundación:

- Anchura de carreteras con un carril: arcén 1,00 m + carriles de 3,50 m + arcén 1,00 m = 5,5 m
- Anchura de carreteras con dos carriles: arcén 1,00 m + carril 3,50 m + zona intermedia 1,00 m + carril 3,50 m + arcén 1,00 m = 10,00 m

3.2. Metodologías de estimación del coste del daño en las carreteras y ferrocarriles

Según la revisión de la literatura técnica especializada (Huizinga *et al.*, 2017), los valores máximos de daños para las infraestructuras se han registrado según diferentes continentes. El número de valores de daño máximo disponibles es bastante bajo (aproximadamente 10 valores registrados individuales en todos los continentes) y varía considerablemente debido a los diferentes métodos para determinar el daño máximo.

El valor promedio para Europa es de 24 euros/m^2 (nivel de precios correspondiente al año 2007) a partir de los datos de cinco países con una larga trayectoria establecida en la evaluación de daños: Reino Unido, Alemania, Países Bajos, Bélgica y Francia. El costo máximo de daños en los ferrocarriles es de 1179 euros/m (Huizinga *et al.*, 2017). El procedimiento aplicado para actualizar el valor máximo de daño para las carreteras en Europa ha sido:

1. Convertir el valor máximo de daño al nivel de precios de 2010, aplicando el aumento promedio del IPC de los cinco países (Banco Mundial, 2014).
2. Calcular el PIB / cápita (2010) en UDS2015, calculando el PIB promedio / cápita 2010 para los cinco países diferentes - sitio web del Banco Mundial (2015).

3.3. Metodologías de estimación de la vulnerabilidad: funciones magnitud-daño

Existe una amplia variedad de modelos de daños causados por inundaciones en uso en el ámbito internacional, que difieren sustancialmente en sus enfoques y estimaciones económicas. En casi todos los modelos más utilizados, la profundidad de la inundación se trata como el factor determinante del daño esperado, a veces complementado por otros parámetros como la velocidad, la duración de la inundación, la contaminación del agua, la precaución y el tiempo de aviso (Messner *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2010; Green *et al.*, 2011).

Las funciones de daño según la profundidad representan relaciones entre la profundidad de la inundación y el daño resultante. Para una profundidad de inundación dada, la función otorga pérdidas esperadas a una propiedad específica o tipo de uso del suelo, ya sea como un porcentaje de un valor de activo predefinido (función relativa) o directamente en términos financieros (función absoluta).

Algunos modelos de parámetros múltiples desarrollados recientemente son conceptuales o desarrollados (y validados) para áreas específicas, por ejemplo, para Japón o para Alemania. Entre estas funciones se ha empleado el modelo de parámetros múltiples de *German FLEMO* (Kreibich *et al.*, 2010), que se ha seleccionado entre el resto porque es el modelo más reconocido y prestigioso internacionalmente. Además, está basado en la situación infraestructural y la realidad socioeconómica de Alemania, que es la más parecida a España.

3.4. Metodología de análisis de la vulnerabilidad por daños directos

Para analizar los daños directos se han usado las curvas del *JRC Technical Report* (Jan Huizinga *et al.*, 2017; Fig. 3). El objetivo principal del Centro de Investigación Conjunta de la Dirección General (*DG JRC*; *Joint Research Center*) es proporcionar apoyo científico al proceso de políticas europeas. En particular, las áreas de políticas de clima y energía están parcialmente cubiertas por la Dirección C de Energía, Transporte y Clima. Con respecto a la política climática, el CCI ha coordinado los proyectos PESETA (Proyección de los impactos económicos del cambio climático en sectores de la Unión Europea basados en análisis de abajo hacia arriba) con el objetivo de realizar una evaluación multisectorial coherente de los impactos del cambio climático en Europa a lo largo del siglo XXI.

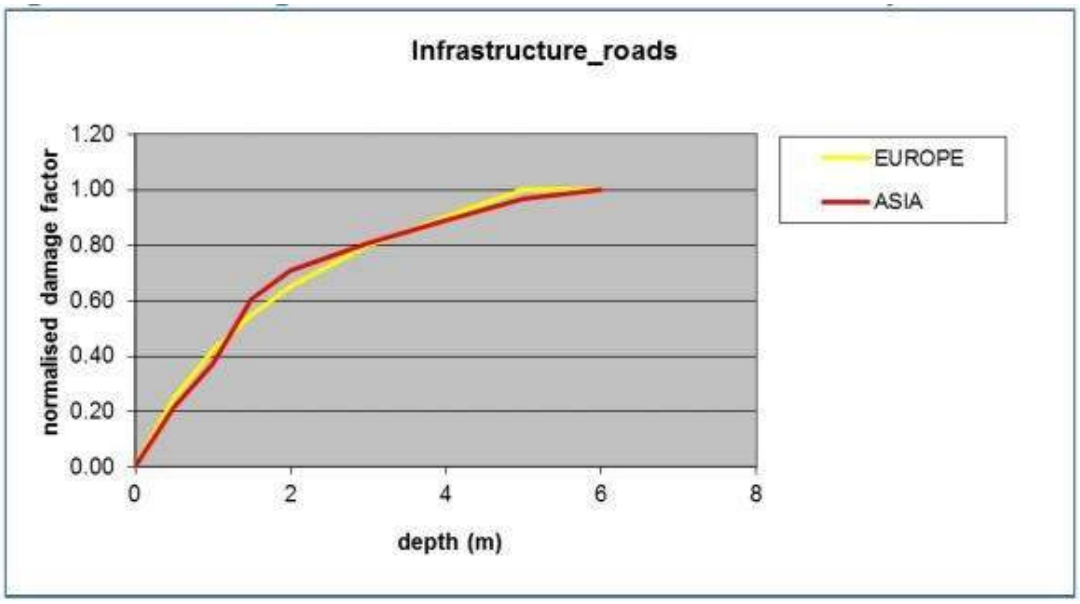


Figura 3. Funciones de calados-daños directos para infraestructuras en Europa y Asia. Fuente: *JRC Technical Report* (Jan Huizinga *et al.*, 2017).

3.5. Metodología de análisis de la vulnerabilidad por daños indirectos

Para estimar el daño indirecto y jerarquizar las redes de transporte, se ha usado la curva de *Rhine Atlas* (DM1). El método del Atlas del Rhin (Buiteveld, 2016) originalmente utiliza el conjunto de datos de cobertura terrestre de CORINE y distingue seis categorías de daños. Para tres tipos de uso del suelo (residencial, industrial e infraestructura) se distingue una categoría de daños inmóviles (bienes raíces) y móviles (por ejemplo, artículos para el hogar). Las curvas de daño según la profundidad (Fig. 4) y las cifras para el valor total de los elementos en riesgo se han obtenido utilizando datos de la base de datos alemana HOWAS y de expertos de diferentes sectores y países. Los valores de los elementos en riesgo se basan en valores de mercado (a diferencia de los valores de reemplazo). Los daños a los vehículos, los daños indirectos y los costos de los servicios de emergencia no se consideran en este método.

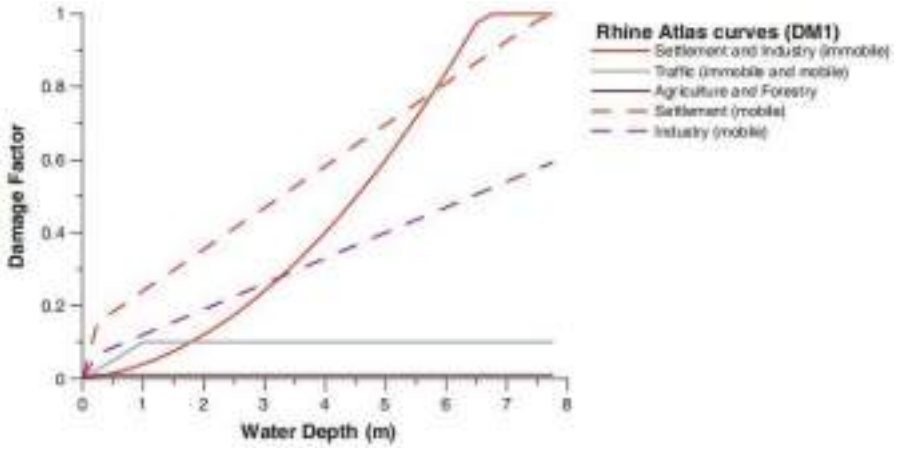


Figura 4. Curvas *Rhine Atlas* para la vulnerabilidad de diferentes elementos, entre ellos el tráfico (móvil e inmóvil).

En la curva referida a '*Traffic (immobile and mobile)*' (Fig. 4) puede observarse que el daño al transporte llega a un máximo a la profundidad de 1 metro. Es decir, en zona con profundad más de 1 metro, hay cortes en las redes de transporte. Con esa función se ha realizado un mapa del corte de transporte y se han jerarquizado las rutas en la zona de estudio.

4. RESULTADOS

Como resultados de la integración con el SIG de las cartografías y bases de datos georreferenciadas de los tres factores (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad), utilizando los valores y funciones de la metodología, se han obtenido diversas cartografías de daños estimados para las diferentes infraestructuras de transporte, según tres periodos de retorno (10, 100 y 500 años); y, además, tablas de valores de daños económicos potenciales integrando los valores unitarios.

4.1. Estimación de daños potenciales en carreteras

En caso de una inundación de periodo de retorno de 10 años, los daños provocados al sistema de carreteras de la zona investigada serían leves y las carreteras afectadas se encontrarían principalmente en el sector cercano a la ciudad Zamora. La mayoría de las carreteras sufrirían una magnitud de daño entre 0,4-0,5 sobre 1,0; y el coste total sería 1,6 millones de euros.

En caso de una inundación de periodo de retorno de 100 años, la situación es más grave que la anterior, como es lógico. En los sectores este y sur del río en la ciudad Zamora habría varios tramos largos de las carreteras afectados, con magnitud de daños entre 0,75 y 0,85. En el sector del valle cerca de la ciudad de Toro también existirían carreteras afectadas, pero con un daño más leve, entre 0,5-0,6. El coste total sería de unos 6,0 millones de euros.

En caso de una inundación de periodo de retorno de 500 años, la situación de las carreteras sería mucho más grave. Cerca de la ciudad Zamora, las carreteras estarían totalmente destruidas, y no existiría salida por el sur, este y oeste de la ciudad por estar la zona totalmente inundada (Fig. 5). En el sector cercano a Toro la situación sería algo mejor con solo una pequeña parte de las carreteras destruidas, aunque la mayoría estaría afectada por la inundación.



Figura 5. Mapa de Magnitud de Daño (tanto por uno) de las carreteras en el entorno de la ciudad de Zamora para la inundación de 500 años de periodo de retorno (T500).

4.2. Estimación de daños potenciales en ferrocarriles

En el caso del periodo de retorno de 10 años existirían 2.149,6 m de ferrocarriles afectados, con un coste total de 959.035,60 €. En general los ferrocarriles estarían poco afectados, y con daños leves (0,3 sobre 1,0), con la excepción de un tramo en el valle cerca de la ciudad de Toro, más afectado y con daños importantes.

En el caso del periodo de retorno de 100 años existirían 6.014,6 m de ferrocarriles afectados, con un coste total de 2.708.663 €. Los daños son más importantes, a parte de la zona valle, en el noreste de Zamora, donde también hay tramos afectados, pero sin daños graves.

Con el periodo de retorno 500 años existirían 14.505,9 m de ferrocarriles afectados, con un coste total de 6.475.997,19 €. Casi la mitad de las líneas del ferrocarril en esta zona estarían afectadas y los daños serían graves en la zona valle y en el noreste de la ciudad Zamora (Fig. 6).



Figura 6. Mapa de cortes de ferrocarriles convencionales en el sector próximo a la ciudad de Zamora para la inundación de 500 años de periodo de retorno (T500).

4.3. Estimación total de los daños potenciales sobre infraestructuras de transporte

A modo de sumatorio de todas las estimaciones de daños para ambos tipos principales de infraestructuras de transporte y para los distintos periodos de retorno, las pérdidas económicas potenciales estimadas son las que se reflejan en la Tabla 1.

Periodo Retorno (años)	Carreteras (M €)	Ferrocarriles (M €)	Total (M €)
T10	1,6	1,0	2,6
T100	6,0	2,7	8,7
T500	10,0	6,5	16,5

Tabla 1. Valores de daños potenciales estimados (redondeados en M€) para las infraestructuras de transporte del tramo Toro-Zamora y diferentes periodos de retorno considerados.

5. DISCUSIÓN

La realización de este estudio ha tenido una serie de dificultades y limitaciones por las fuentes de datos y métodos utilizados, que podrían resumirse en:

- Los mapas de calados elaborados por la DGA (SNCZI) y descargados de la web del IGN están divididos en varias coberturas, que para el caso del tramo Toro-Zamora fueron realizadas por tres diferentes empresas consultoras con distintos criterios y categorizados en diferente número de clases (10 ó 11), lo que ha hecho preciso labores de homogenización para solventarlo en las uniones y ajustes de valores de los intervalos, con los consiguientes errores e incertidumbres.
- Los efectos de la profundidad de agua pueden variar en diferentes tipos de carreteras, pero las funciones daño-profundidad que se aplican en este estudio son para las carreteras en general, por falta de información más específica.
- Los módulos de daño y coste que se aplican en esta investigación son valores del nivel promedio de Europa. Faltan por desarrollarse módulos locales, útiles para cada país o región, y que mejorarían notablemente las estimaciones.
- Se planeó originalmente realizar la jerarquización de las rutas alternativas en caso de inundaciones. Pero se necesitaba crear una nueva capa de rutas con las propiedades (velocidad máxima de cada ruta, etc.) que no están disponibles en los mapas del IGN, ya que existen muchos tramos de rutas sin registro ni etiquetas.

Por lo anteriormente expuesto, no se ha podido abarcar y analizar los costes indirectos específicos derivados de la rotura de las infraestructuras de transporte y la interrupción de los flujos comerciales y servicios (como el lucro cesante); ni tampoco los derivados de la adopción de itinerarios alternativos durante la inundación, más largos y costosos. Tampoco se han tenido en consideración los costes financieros derivados del diseño y ejecución de las obras de reparación o reposición de las infraestructuras dañadas. Estas estimaciones mejorarían y completarían el análisis económico, haciéndolo más realista, pero excedían el alcance de este estudio por falta de información económica de base sobre las infraestructuras de transporte y la situación financiera de las instituciones y entidades encargadas de su gestión y mantenimiento.

6. CONCLUSIONES

Según el análisis de estimación de daños por inundaciones en infraestructuras de transporte del tramo del valle del Duero entre Toro y Zamora, en la zona alrededor de la ciudad Zamora, en la primera curva de meandro del río Duero aguas arriba se encuentran las carreteras más afectadas por las inundaciones. Especialmente los tramos de la 'A-66', 'N-122' y 'ZA-12'. Y también en la zona de Toro existen varias carreteras afectadas, que son la 'ZA-P-2102', 'ZA-166' y 'ZA-633'.

En caso de una inundación con periodo de retorno de 10 años, el coste total sobre la infraestructura sería 2,6 millones de euros; dentro de ellos, 1,6 millones € serían por el daño en las carreteras y el resto en los ferrocarriles. En caso de una inundación con periodo de 100 años el coste total de la infraestructura sería 8,7 millones de euros; dentro de ellos, 6,0 millones € serían por el daño en las carreteras y el resto en los ferrocarriles. En caso de una inundación con el periodo de 500 años el coste total sobre las infraestructuras sería 16,5 millones de euros; dentro de ellos, 10,0 millones € son por el daño en las carreteras y el resto en los ferrocarriles.

Este tipo de análisis deberían tenerse en cuenta en los planes de protección civil de ámbito local de los municipios afectados, en los planes de gestión del riesgo de inundación para las ARPSI implicadas y en los estudios coste-beneficio de las medidas de mitigación del riesgo que de ellos deriven.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer su colaboración a la Dirección General del Agua (Francisco Javier Sánchez, Mónica Aparicio y Juan Francisco Arrazola) por la cesión de las cartografías de peligrosidad de inundaciones (calados y velocidades) del SNCZI y por las recomendaciones para la fusión de las coberturas en diferentes tramos colindantes.

La presente comunicación es un resumen revisado del trabajo fin de máster del primer autor, codirigido por los otros autores, titulado "Vulnerabilidad de las infraestructuras de transporte frente al peligro de inundaciones. Aplicación a las márgenes del río Duero entre Zamora y Toro", presentado en el Máster Universitario en Gestión de Desastres (UPM-UCM), durante el curso académico 2017-2018, y defendido en julio de 2019. Por ello también se agradece la labor de intermediación al Dr. Ing. Francisco Javier Elorza (ETSIME, UPM), como profesor del citado máster.

Este estudio forma parte de la tarea de evaluación socio-económica de los daños por inundaciones (GT1.T4), del proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE).

REFERENCIAS

- Arnell, N. W. and Gosling, S. N. (2014). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5
- Buiteveld, H. (2016). *Tool and Assessment Method for Determining Flood Risk Evolution or Reduction* - Technical Report, Report No. 237, ICBR-expertgroep HIRI, Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR), Koblenz.
- Confederación Hidrográfica del Duero (2016). *Plan de Gestión de Riesgos de Inundación (2016). Anejo 1. Caracterización de las ARPSIs*. Valladolid.
- De Mora Jiménez, E. y Díez Herrero, A. (2008). Análisis del riesgo de inundación en localizaciones puntuales: el edificio Sabatini (Toledo). En: I. Galindo Jiménez, L. Laín Huerta y M. Llorente Isidro (Eds.), *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*, 9-52. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, nº 12, Capítulo 3. IGME y Consorcio de Compensación de Seguros (MEH), Madrid.
- Garrote, J., Alvarenga, F. M. y Díez-Herrero, A. (2016). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541, 611–625.
- Green, C., Viavattene, C. and Thompson, P. (2011). *Guidance for assessing flood losses* - CONHAZ Report. No. D6.1. Middlesex University.
- Huizinga, J., De Moel, H. and Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines*. JRC Technical Reports, EUR 28552 EN, Joint Research Center, European Union.
- Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B. and Thieken, A. H. (2010) Development of FLEMOcs - A new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. *Hydrological Science Journal*, 55(8), 1302-1314.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. and Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage. Review article. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1697-1724. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., and Van der Veen, A. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. FLOODSite Consortium. Report T09-06-01.
- Ministerio de Fomento (2009). *Inventario de Características Geométricas y de Equipamiento. Manual de Criterios*. Peticionario: Ministerio de Fomento, diciembre 2009.
- Paprotny, D., Kreibich, H., Morales-Nápoles, O., Castellarin, A., Carisi, F. and Schröter, K. (2020).

Exposure and vulnerability estimation for modelling flood losses to commercial assets in Europe. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140011

EL GÉNERO COMO FACTOR DE FORMULACIÓN PARA LA CREACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTALES

Marcus Alexsander Dexheimer
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil
marcus.dexheimer@tjsc.jus.br
http://lattes.cnpq.br/9547542689390588

Mably Rosalina Fernandes
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Brasil
mably.adv@gmail.com
http://lattes.cnpq.br/2977585072751618

RESUMEN

Delante de la crisis ambiental que asola al planeta y del sinnúmero de acciones estatales formuladas para promover el desarrollo sostenible, es importante preguntarse cuanto el cambio de los valores culturales construidos a lo largo de la historia puede perfeccionar las políticas públicas ambientales. Es lo que propone el presente artículo que rescata la importancia de la igualdad de género para la construcción de la sostenibilidad ambiental. Así, a partir de una revisión bibliográfica, se analiza la influencia histórica en la desigualdad social entre hombres y mujeres, el papel del ente estatal para la construcción de una democracia social y ambiental que, por consiguiente, rescata la importancia de la discusión de género para la creación y el establecimiento de políticas públicas ambientales.

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de la vida en la tierra está directamente conectada a la toma de decisiones políticas de enfrentamiento a los riesgos del desarrollo económico y social que, desde el siglo XXI, se basa solamente en la filosofía utilitarista tradicional. Desde otro punto, el sensible vislumbre del riesgo inminente de extinción de la vida humana, hizo que esas decisiones políticas fuesen implementadas a través de políticas públicas ambientales (Garcia, 2015, p. 254). También es cierto, por otro lado, que la preocupación ecológica constituye un fenómeno relativamente reciente, consecuencia del escenario contemporáneo (identificado a partir de la segunda mitad del siglo XX), de agotamiento de los recursos naturales, proceso este que fue apalancado por la Revolución Industrial y culminado por la proliferación de la sociedad de consumo.

Es incontestable que el medio ambiente actualmente es una preocupación que se arrastra en la sociedad, pauta recurrente de la política de Estado, dado al hecho de que el propio riesgo de agotamiento de los recursos naturales y por consecuencia de la extinción humana, necesita de atención y, principalmente, de una acción efectiva de cuidado. Es necesario reconocer que la razón de ser de la existencia del estado es asegurar un determinado núcleo de derechos a sus ciudadanos y que la democracia representa el mejor medio para que el Estado cumpla ese papel.

Instituciones como Estado, república y democracia nunca representan conceptos definitivos y siempre han de ser revisados y perfeccionados, ya sea por el aprendizaje de los errores y aciertos colocados

en evidencia por la historia, o ya sea por medio de formulaciones teóricas que puedan venir a ganar cuerpo. La democracia, por lo tanto, debe ser un espacio de realización existencial, en el que cada ciudadano se relaciona con la sociedad, con el ente estatal y con el mercado, consciente de la existencia y de la dimensión de las consecuencias de cada uno de sus actos practicados en el espacio público. Problemas locales y globales se volvieron, en un mundo que parece cada vez menor y más complejo, más íntimos e interrelacionados. Cada decisión política tomada en la esfera estatal posee inmensa repercusión sobre el cotidiano de las personas y, principalmente, sobre el futuro muy próximo, especialmente en lo que concierne a los problemas ambientales (Dexheimer, 2006, p. 17).

2. GÉNERO COMO FACTOR DE FORMULACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTALES

Sobre el tema Garcia (2015, p. 336/337, nuestra traducción[1]) aclara:

> *En resumen, vivimos en comunidad política, en un mundo de instituciones que conformamos y nos conforman y de que la Constitución es clave. Contribuyen para nuestra libertad y son evaluadas por el modo como contribuyen y garantizan el mantenimiento de la comunidad política. Fue en libertad que nuestra civilización despertó para la cuestión ecológica y es en libertad que analizamos las instituciones tradicionales, porque la cuestión ecológica se tornó política. En un horizonte ético que alcanza la relación del hombre con la naturaleza, a través del hombre se identifican tres realidades. En primer lugar, la imposibilidad de proveer la totalidad de las consecuencias de la acción, por insuficiencia de informaciones y conocimientos sobre las situaciones. Es una reflexión nueva que estremece las bases de la responsabilidad técnico-jurídica, basado en la subjetividad y en el nexo casual, para más allá de la ilicitud y del daño. Incorporar en el derecho un sentido de justicia que tenga presente la ignorancia humana sobre las consecuencias de la acción, se vuelve una prioridad. En segundo lugar, el conocimiento del que las acciones comunitarias, personales e institucionales, afectan la calidad de vida de las generaciones venideras. Es una nueva realidad que torna la calidad de vida presente razón de la deterioración de la calidad de vida futura y obliga a encontrar forma de compartir con las generaciones futuras las oportunidades y daños – justicia intergeneracional. En tercer lugar, la consciencia de las acciones comunitarias, personales e institucionales afectan la calidad de vida de las generaciones contemporáneas, desparramadas en el espacio territorialmente irrestricto de la Tierra. La calidad de vida de unos es hecha en la calidad de vida de otros, por lo que también aquí es necesario pensar en una manera de compartir oportunidades y daños-justicia intra-generacional.*

[1] "Em suma, vivemos em comunidade política, num mundo de instituições que conformamos e nos conformam e de que a Constituição é chave. Contribuem para a nossa liberdade e são avaliadas pelo modo como contribuem e garantem a manutenção da comunidade política. Foi em liberdade que a nossa civilização despertou para a questão ecológica e é em liberdade que reflectimos as instituições tradicionais, por que a questão ecológica se tornou político. Num horizonte ético que abrange a relação do homem com a natureza, através do homem, identificam-se três realidades. Em primeiro lugar, a impossibilidade de prover a totalidade das consequências da ação, por insuficiência de informações e conhecimentos sobre as situações. É uma reflexão nova que abala os alicerces da responsabilidade técnico-jurídica, assente na subjectividade e no nexo casual, para além da ilicitude e do dano. Incorporar no direito um sentido de justiça que tenha presente a ignorância humana sobre as consequências da ação torna-se uma prioridade. Em segundo lugar, o conhecimento do que a ações comunitárias, pessoais e institucionais, afetam a qualidade de vida das gerações vindouras. É uma realidade nova que torna a qualidade de vida presente razão da deterioração da qualidade de vida futura e obriga a encontrar forma de partilhar com as gerações futuras as oportunidades e danos – justiça intergeracional. Em terceiro lugar, a consciência de que as ações comunitárias, pessoais e institucionais, afetam a qualidade de vida das gerações contemporâneas, espalhadas no espaço territorialmente irrestrito da Terra. A qualidade de vida de uns é feita à custa da qualidade de vida de outros, pelo que também aqui é necessário pensar um modo de partilhar oportunidades e danos – justiça intrageracional."

Como defiende Sabsay, el cumplimento de metas tan ambiciosas como aquellas delineadas por la sostenibilidad, requieren la organización de estructuras de Estado aptas para tanto (Sabsay, 2000, p. 43). De acuerdo con Canotilho, está asociada al concepto de "Estado Constitucional Ecológico" la idea de "democracia sustentada", enunciado que por su vez, se funde en dos suposiciones: (1) el Estado constitucional, además de ser y deber ser un Estado de Derecho democrático y social, debe ser también un Estado orientado por principios ecológicos ; (2) el Estado ecológico se refiere a nuevas formas de participación política sugestivamente condensadas en la expresión democracia sustentada (Canotilho, 2001, p. 9).

Y para Capella, Estado de Derecho del ambiente puede ser definido como una concepción de Estado que "se dispone a aplicar el principio de la solidaridad económica y social, para alcanzar un desarrollo sostenible orientado a buscar la igualdad sustancial entre los ciudadanos por medio del control jurídico del uso racional del patrimonio natural" (Capella, 1994, P. 248).

Ese Estado, de acuerdo con Leite, se dirige, obligatoriamente, para cambios radicales en las estructuras existentes de la sociedad organizada. Y no hay como negar que la concientización global de la crisis ambiental exige una ciudadanía participativa que constituye una acción conjunta del estado y de la colectividad en la protección ambiental (Leite, 2002, p. 9).

En ese contexto, el aparato jurídico –normativo del Estado es determinante para que pueda cumplir sus nuevas funciones, especialmente en lo que concierne a su misión fundamental de protección ambiental. En esa sociedad ocupada por hombres y mujeres que no están en pie de igualdad social, el tema del medio ambiente y su preservación también es tratado de manera diferente en la perspectiva de género.

Thomas Laqueur afirma que un modelo para distinción biológica entre el sexo de la mujer y el del hombre sucedió a partir del siglo XVIII. Así, de acuerdo con Laqueur (2001, p. 27, nuestra traducción[2]):

> *El sexo, como el ser humano, es contextual. Las tentativas de aislarlo de un medio discursivo y determinado socialmente son tan predestinadas al error como la búsqueda del philosophe por un niño verdaderamente salvaje o los esfuerzos del antropólogo moderno para filtrar lo cultural y dejar un residuo de humanidad esencial. Y también agregaría que el cuerpo probado, inclusive estable, que parece existir en las bases de las nociones modernas de diferencia sexual, es también producto de momentos específicos, históricos y culturales.*

Joan Scott defiende la que existe una variedad de enfoques para el análisis del género, pero que, básicamente, puede limitar tales enfoques a tres aspectos: en un momento inicial una tentativa del movimiento feminista de delimitar el género- como una manera de explicación para el patriarcado; la segunda está totalmente conectada con las ideas marxistas y también tiene semejanza con las críticas de los movimientos feministas; y por último un enfoque dividido entre " el pos estructuralismo francés y las teorías angloamericanas de relación del objeto (object-relation-theories), se inspira en esas diferentes escuelas de sicoanálisis para explicar la producción y la reproducción de la identidad de género del sujeto" (Scott, 1995, p. 77).

[2] "O sexo, como o ser humano, é contextual. As tentativas de isolá-lo de seu meio discursivo e determinado socialmente são tão fadadas a erro como a busca do philosophe por uma criança verdadeiramente selvagem ou os esforços do antropólogo moderno para filtrar o cultural e deixar um resíduo de humanidade essencial. E acrescentaria ainda que o corpo provado, incluso, estável, que parece existir nas bases das noções modernas de diferença sexual, é também produto de momentos específicos, históricos e culturais."

La autora parte de la suposición de que "[…] *el género es un elemento constitutivo de relaciones sociales fundadas sobre las diferencias notadas entre los sexos […]"* (Scott, 1990, p. 14).
Ahora, para Pierre Bourdieu (1999, p. 33/34, nuestra traducción[3]), el género puede ser definidos como:

- Una estructura de dominación simbólica androcéntrica, esto quiere decir, centrada en normas y valores masculinos;
- Un hábitus, es decir, una estructura sicosomática, dominante o dominado;
- Un principio de división, de acuerdo con el cual el orden social se divide en diferentes campos, masculino/femenino, las identidades sociales se constituyen como pares opuestos y dicotómicos, y los sujetos aprenden a ver tales divisiones como naturales y a construirse y posicionarse en conformidad con ellas.

Diversos son los ejemplos de cuanto esa diferencia biológica y de género atraviesa la individualidad del ser humano en nuestra sociedad, resultando en una desigualdad social. En el seno de la estructura familiar, por ejemplo, el trabajo doméstico no es considerado como una actividad de todos los individuos que habitan el hogar, corresponde solamente a una "obligación" familiar que está ligada apenas a las mujeres (Herrera, 2009, p. 38).

Cuando la diferencia de género sobre pasa el campo de la diferencia y nace una desigualdad social, surgen los movimientos para que esa equidad social sea de hecho conquistada, a los movimientos que buscan igualdad de género entre mujeres y hombres la denominamos "movimientos feministas".

En las palabras de Tardin et al. (2015, p. 127, nuestra traducción[4]):

> *El movimiento feminista fue dividido en "ondas", siendo "la primera onda" conocida básicamente por la lucha por el voto femenino. El movimiento ganó fuerza en el siglo XIX y en el comienzo del siglo XX, y fue reconocido por la movilización de mujeres que exigían su derecho a la ciudadanía sin discutir los otros papeles domésticos, destacando principalmente su carácter político , el derecho de votar (votar y ser votada), derecho a la educación con enseñanza igual a la de los hombres, habilitando así la participación de la mujeres en la política y, posteriormente la ocupación de ellas en los mismos cargos de los hombres, además del derecho al trabajo remunerado con sueldo igual por trabajo igual. El feminismo de "primera onda" fue mal recibido por la sociedad, porque no se esperaba que las mujeres saliesen de sus casas y luchasen por derechos igualitarios. Así las mujeres que tuvieron la osadía de luchar fueron ridiculizadas, siendo llamadas de mal amadas, solteronas, rencorosas o hasta de mujeres-hombres.*

[3] "• uma estrutura de dominação simbólica androcêntrica, isto é, centrada em normas e valores masculinos;
• um habitus, isto é, uma estrutura psicossomática, dominante ou dominado;
• um princípio de divisão, segundo o qual a ordem social se divide em campos distintos, masculino/feminino, as identidades sociais se constituem como pares opostos e dicotômicos, e os sujeitos aprendem a ver tais divisões como naturais e a se construírem e posicionarem em conformidade com elas."

[4] "O movimento feminista foi dividido em "ondas", sendo "a primeira onda" conhecida basicamente pela luta pelo sufrágio feminino. O movimento ganhou força no século XIX e início do XX, e foi reconhecido pela mobilização de mulheres que exigiam o seu direito à cidadania sem questionar os outros papéis domésticos, destacando principalmente o seu caráter político, o direito ao voto (votar e ser votada), direito à educação com ensino igual ao dos homens, habilitando assim, a participação das mulheres na política e posteriormente a ocupação delas nos mesmos cargos dos homens,além do direito ao trabalho remunerado com salário igual por trabalho igual. O feminismo de "primeira onda" foi mal recebido pela sociedade, pois não se esperava que as mulheres saíssem de suas casas e lutassem por direitos igualitários. Assim, as mulheres que ousavam lutar eram ridicularizadas, sendo chamadas de mal amadas, solteironas, rancorosas ou mesmo mulheres-homens."

En la perspectiva de los derechos humanos, Andreas Hofbauer (2011, p. 71/72, nuestra traducción[5]), explora las diferencias en las sociedades en la siguiente exposición:

> *Es lícito afirmar que todas las sociedades reconocen diferencias de diversos órdenes (peculiaridades físico fenotípicas, (falta de) habilidades especiales, diferencias en términos de edad y género, así como de estatus, de poder, etc.) y tienen nociones de justica apoyadas en determinadas concepciones del mundo (en forma de cosmologías y/o ideologías). Cuales son las diferencias que son vistas como justas y cuales las que son vistas como injustas varía, pero entre las sociedades. Y existen, evidentemente también, disputas internas al respecto de tales evaluaciones. Sin embargo, generalmente hay algunas concepciones que se imponen como discursos hegemónicos y que intentan explicar y justificar ciertas diferencias como benignas para la cohesión y la integridad del cuerpo social, así como condenar otras como socialmente malignas o inmorales, que pueden llegar a ser identificadas y reprobadas como "desigualdad".*

Históricamente hablando, a partir de la segunda mitad del siglo XX, a través de las emergentes luchas de las mujeres y también de otros grupos clasificados como minorías, buscaron una nueva tendencia de proyecto de modernidad- donde acentuaban que había otras diferencias en las sociedades modernas capitalistas además de las clases sociales (Hofbauer, 2011, p. 79).

En ese contexto, José D´Assunção Barros (2006, p. 210, nuestra traducción[6]), busca conceptuar esas diferencias ya mencionadas como una desigualdad propiamente dicha:

> *Un último ejemplo permite entender que la Diferencia también puede ser leída como Desigualdad para atender a determinados proyectos sociales de dominación. En la filosofía de la primera Edad Media, ocurrió la idea de que la Mujer era un Hombre incompleto (así como la de que el niño es un adulto incipiente). Se percibe aquí que, una Diferencia sexual natural, bastante evidente, es releída como una Desigualdad en el origen. De acuerdo con las implicancias de esta, hoy extraña perspectiva sobre los sexos, la propia Naturaleza habría tratado desigualmente a los seres en su origen, generando unos que son completos y otros que son incompletos. Ahí se crea una jerarquía "natural" que refuerza las jerarquías sociales y políticas, en la que el completo está encima del incompleto, o del Hombre encima de la Mujer.*

También, de la lectura de los autores arriba nombrados, se extrae que esa diferencia que puede generar una desigualdad social y (en el caso de las mujeres, ya en la primera Edad Media se creía que la mujer era un hombre incompleto), tal base hace como que se pueda pensar en: como una diferencia biológica

[5] "É lícito afirmar que todas as sociedades reconhecem diferenças de diversas ordens (peculiaridades físicas-fenotípicas, (des)habilidades especiais, diferenças em termos de idade e gênero, assim como de status, de poder etc.) e possuem noções de justiça ancoradas em determinadas concepções do mundo (em forma de cosmologias e/ou ideologias). Quais diferenças são vistas como justas e quais como injustas frequentemente varia, porém, entre as sociedades. E existem, evidentemente, também disputas internas a respeito de tais avaliações. Geralmente há, no entanto, algumas concepções que se impõem como discursos hegemônicos e que buscam explicar e justificar certas diferenças como benignas para a coesão e a integridade do corpo social, bem como condenar outras como socialmente malignas ou imorais, que podem vir a ser identificadas e reprovadas como 'desigualdade'."

[6] "Um último exemplo permite entender que a Diferença também pode ser lida como Desigualdade para atender a determinados projetos sociais de dominação. Na filosofia da primeira Idade Média, teve ocorrência a idéia de que a Mulher era um Homem incompleto (assim como a de que a Criança é um adulto incipiente). Percebe-se que aqui uma Diferença sexual natural bastante evidente é relida como uma Desigualdade na origem. Segundo as implicações desta hoje estranha perspectiva sobre os sexos, a própria Natureza teria tratado desigualmente os seres em sua origem, gerando uns que são completos e outros que são incompletos. Cria-se aí uma hierarquia "natural", que reforça as hierarquias sociais e políticas, em que o completo está acima do incompleto, ou o Homem acima da Mulher."

puede hacer con que una creencia popular menoscabe determinado sexo y haga que una diferencia se vuelva una desigualdad social que acompaña a la humanidad.

Ese concepto de diferencia es desmenuzado por José D´Assunção Barros (2006, p. 214, nuestra traducción[7]):

> *Y continuando a hablar de la historicidad de las Diferencias, es muy importante recordar que la propia selección social de aquello que será destacado como diferencia importante es también un producto histórico, hasta en lo que se refiere a los llamados aspectos naturales. Sacando las diferencias sexuales y etarias, las cuales se imponen naturalmente, existen decenas de particularidades biológicas que no son percibidas o valorizadas socialmente, y otras que pueden serlo. (...) En su enorme diversidad dentro de la especie humana, todos los hombres presentan un sinnúmero de diferencias de unos con relación a los otros, y un sinnúmero de posibilidades de grupos. Ese sinnúmero de distinciones, como ya se pudo notar, pueden ser de orden natural o cultural, pero no todas las diferencias naturales y culturales son seleccionadas como diferencias sociales. Podemos decir que ellas, muchas veces, permanecen apenas como distinciones que no llegan a generar la formación de grupos, estratificaciones, procesos de discriminación, procesos de afirmación de identidad social, y así por delante.*

Esas diferencias en la sociedad también forman una diferencia en la percepción ambiental de mujeres y hombres, la subordinación de la mujer y el sistema patriarcal trae reflejos para la cuestión ambiental, donde se demuestra la necesidad de políticas públicas y ambientales que traigan en su formación esa percepción de diferenciación del género, buscando igualdad y sostenibilidad.

Mister resalta que, a lo largo del transcurso de la percepción ambiental, la lucha feminista fue claramente perceptible en diversos casos- siendo impar para la construcción histórica de la temática el caso Green Belt Movement, que fue liderado por Wangari Maathai, un programa rural de plantación de árboles que transformó las reformas democráticas en Estados Unidos (Pureza et al., 2001, p. 8).

Sobre esas luchas por políticas públicas ambientales volcadas para las mujeres, otro movimiento emblemático fue el "Movimiento Cinturón Verde ", sobre el tema (Pureza et al., 2001, p. 8/9, nuestra traducción[8]):

> *El Movimiento Cinturón Verde se asumió siempre como un programa de mujeres y fue organizado a través del Consejo Nacional de la Mujer. Su objetivo era el de resolver el problema de combustible en las zonas rurales, así como prevenir la desertificación y la erosión del suelo, rodeando cada aldea con un "cinturón verde" de, por lo menos, mil árboles. [...] Por la mitad de la década del 80 habían sido creados 600 viveros que empleaban*

[7] "Ainda falando da historicidade das Diferenças, é muito importante lembrar que a própria seleção social daquilo que será destacado como diferença relevante é também um produto histórico, mesmo no que se refere aos chamados aspectos naturais. Tirando as diferenças sexuais e etárias, que se impõem naturalmente, existem dezenas de especificidades biológicas que não são percebidas ou valoradas socialmente, e outras que podem sê-lo. (...) Em sua enorme diversidade dentro da espécie humana, todos os homens apresentam inúmeras diferenças de uns em relação aos outros, e inúmeras possibilidades de agrupamentos. Essas inúmeras distinções, como já se deu a perceber, podem ser de ordem natural ou cultural, mas nem todas as diferenças naturais e culturais são selecionadas como diferenças sociais. Vale dizer que, muitas vezes, elas permanecem apenas como distinções que não chegam a gerar a formação de agrupamentos, estratificações, processos de discriminação, processos de afirmação de identidade social, e assim por diante."

[8] "O Movimento Cinturão Verde assumiu-se sempre como um programa de mulheres, e foi organizado através do Conselho Nacional da Mulher. O seu objetivo era o de resolver o problema de combustível nas zonas rurais, assim como prevenir a desertificação e a erosão do solo, rodeando cada aldeia com um "cinturão verde" de pelo menos mil árvores. [...]. Em meados de 80 tinham sido criados 600 viveiros, que empregavam duas a três mil mulheres, e tinha-se plantado mais de um milhão de árvores."

> *de dos a tres mil mujeres, y se habían plantado más de un millón de árboles.*

El concepto de género toma un nuevo rumbo cuando es conectado a las cuestiones ambientales. Eso sucede porque, de la vivencia y de la incorporación de acciones de hombres y de mujeres en las políticas y en los programas, nace la necesidad de que las políticas públicas sean efectivamente concretas y así puedan garantizar una participación más efectiva para alcanzar un desarrollo humano sosotenible (Castro y Abramovay, 2005 p. 38, nuestra traducción[9]).

Pero también es crucial registrar que a través de la búsqueda de la emancipación femenina en Brasil, hubo una respuesta Estatal con la promulgación de la Constitución Federal de 1988, porque de acuerdo con lo ya dicho en el inicio del texto legal la Carta Magna adoptó en uno de sus fundamentos, el principio de la dignidad de la persona humana, y con eso trazó como objetivo fundamental el fomento de la igualdad de origen, raza, sexo, color y edad. Ese marco político-democrático reforzó el surgimiento de políticas públicas, volcadas para el alcance de esa igualdad.

3. CONCLUSIÓN

Por lo tanto y a modo de conclusión, hay que tener presente que el análisis de la percepción ambiental con diferenciación de género trae para el seno de una política pública la real identificación de la necesidad de una sociedad, pudiendo direccionar de manera eficiente cual método/práctica adoptar para alcanzar una sostenibilidad ambiental.

Tal estructuración de una política pública ambiental eficaz exige la necesidad de que la administración pública tenga una visión de gestión ambiental integrada – mismo que sea desarrollada con base en las individualidades del colectivo, de acuerdo con lo que explica Caldwell (1997, p. 18):

> *Para competir con los principales problemas ambientales, es necesaria una organización administrativa que: 1) sea suficientemente amplia para abarcar los problemas bajo combate; 2) facilite la coordinación de todos los esfuerzos relacionados; 3) sea adaptable para las dinámicas del cambio ambiental y para etapas progresivas en la solución de problemas ambientales y 4) sea capaz de obtener, evaluar y aplicar ciencia y tecnologías apropiadas para los problemas* (Caldwell, 1972, citado por Frieder, 1997, p. 18).

Así, al tiempo que se ve que las políticas públicas ambientales deben estar conectadas a las particularidades culturales, de las cuales está llena la estructura social, al agregar el elemento "género" como inherente a la actuación del ente público, se busca reconocer las desigualdades sociales ya existentes y promover, de hecho, una preservación ambiental sensible a las acuciantes necesidades sociales.

REFERENCIAS

- Barros, José D' Assunção (2006). Igualdade, desigualdade e diferença: contribuições para uma abordagem semiótica das três noções. *Revista de Ciências Humanas UFSC*, 39. https://doi.org/10.5007/%25x
- Bourdieu, P. (1999). *A dominação masculina*. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.

[9] "Para competir com os principais problemas ambientais, é necessária uma organização administrativa que: 1) seja suficientemente abrangente para abarcar os problemas sob combate; 2) facilite a coordenação de todos os esforços relacionados; 3) seja adaptável para as dinâmicas da mudança ambiental e para estágios progressivos na solução de problemas ambientais e 4) seja capaz de obter, avaliar e aplicar ciência e tecnologias apropriadas para os problemas. (Caldwell, 1972, citado por Frieder, 1997, p.18)."

- Canotilho, José Joaquim Gomes (2001). Estado constitucional ecológico e democracia sustentada. *Revista do Centro de Estudos de Direito do Ordenamento, do Urbanismo e do Ambiente*, 2, 9-16.
- Capella, Vicente Bellver (1994). *Ecología: de las razones a los derechos*. Ecorama, Granada.
- Castro, Mary Garcia y Abramovay, Miriam (2005). *Gênero e meio ambiente*. 2 ed. Cortez, São Paulo.
- Dexheimer, Marcus Alexsander (2006). *Estatuto da cidade e democracia participativa*. OAB/SC Editora, Florianópolis.
- Flores, Joaquín Herrera (2009). *A reinvenção dos direitos humanos*. Tradução Carlos Roberto Diogo Garcia; Antônio Henrique Graciano Suxberger; Jefferson Aparecido Dias. Fundação Boiteux, Florianópolis.
- Frieder, J. (1997). Approaching sustainability: integrated environmental management and New Zealand's resource management act. Ian Axford Fellowships in Public Policy, New Zealand.
- Garcia, Maria da Glória F. P. D. (2015). *O Lugar do Direito na Protecção do Ambiente*. Edições Almedina, Coimbra.
- Garrido Peña, Francisco (1993). La ecología como política. En: F. Garrido Peña, *Introducción a la ecología política*, 3. Comares, Granada.
- Hofbauer, Andreas (2011). *Cultura, diferença e (des) igualdade*. http://www.contemporanea.ufscar.br/index.php/contemporanea/article/view/21.
- Laqueur, T. (2001). A invenção do sexo: corpo e gênero dos gregos a Freud. Relume-Dumará, Rio de Janeiro.
- Leite, José Rubens Morato y Ayala, Patryck de Araújo (2002). Direito ambiental na sociedade de risco. Forense Universitária, Rio de Janeiro.
- Pureza, J. M., Nunes, J. A. y Moura, T. (2001). *Projecto: conhecimento crítico e movimentos ambientalistas. O ecofeminismo entre o Norte e o Sul*. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sabsay, Daniel Alberto (2000). La problemática ambiental y del desarrollo sostenible en el marco de la democracia participativa. *Revista de Direito Ambiental*, 22, 38-49.
- Scott, Joan (1995). *Gênero: uma categoria útil de análise histórica. Educação e Realidade*.
- Serrano Moreno, José Luis (1993). Ecología, estado de derecho y democracia. En: F. Garrido Peña, *Introducción a la ecología política*, 33-35. Comares, Granada.
- Tardin, Elaine Borges, Barbosa, Murilo Tebaldi y Leal, Polliana da Costa Alberone (2015). Mulher, trabalho e a conquista do espaço público: reflexões sobre a evolução feminina no Brasil. *Revista Transformar*, 7, 127.

CARTOGRAFÍA DE RIESGOS DE INUNDACIÓN Y PLANIFICACIÓN. PROPUESTAS PARA BRASIL DESDE LA EXPERIENCIA ESPAÑOLA

Andrés Molina Giménez
Profesor titular de Derecho Administrativo, Universidad de Alicante, España
andres.molina@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-0088-4374

Ximena Cardozo Ferreira
Promotora de Justiça no Estado do Rio Grande do Sul (Ministério Público/RS), Brasil
xiferreira76@gmail.com

RESUMEN

A partir de un caso de estudio identificado en la cuenca del Rio dos Sinos, en Brasil, donde la actuación del Ministerio Público ha impulsado la adopción de una cartografía de riesgos de inundación como instrumento de planificación territorial, se analiza la normativa brasileña aplicable y se identifican las carencias del sistema jurídico de aquel país. De otra parte, a raíz de las experiencias del derecho comunitario y español en el ámbito de las inundaciones, se aportan propuestas *de lege ferenda* para el perfeccionamiento del ordenamiento jurídico brasileño, que no dispone hasta el momento de normas específicamente destinadas a afrontar el problema de las inundaciones, además de carecer de una norma de rango nacional de ordenación territorial que permita coordinar los diferentes textos normativos con impacto regulatorio en el territorio.

1. LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS INUNDABLES COMO INSTRUMENTO DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

Para promover una gestión eficaz del riesgo de inundación, además de utilizar los instrumentos normativos a disposición de la administración pública, es necesario hacer uso de la herramienta de planificación. Muchos de los problemas derivados del riesgo de inundación son producto, esencialmente, de la falta o insuficiencia de planificación local y regional.

Existen numerosas razones que explican esa carencia: algunas de naturaleza técnica (escaso conocimiento técnico sobre el tema de las inundaciones) y otras de naturaleza política (mala gestión administrativa en todas las esferas, ausencia de conocimiento y participación de los ciudadanos sobre el problema, etc.). Entre ellas, conviene mencionar que la zonificación (control no estructural) supone un desgaste político para el administrador público, ya que la población está siempre a la espera de una obra hidráulica (Tucci, 1997).

Lo cierto es que, en Brasil, y, en cierta medida, también en España, todavía prevalece la "cultura" de las grandes obras de ingeniería como soluciones únicas para los problemas hidrogeológicos, siendo recurrente la opción por alternativas estructurales (en gran parte intensivas) para tratar de controlar las inundaciones. Las medidas no estructurales, como la zonificación de usos, no siempre son recibidas con simpatía por parte de los ciudadanos, ya que comportan limitaciones a los intereses privados con relación al uso del suelo; esto también conlleva un desgaste político no deseado por los

administradores. La definición de los posibles usos de la tierra en un espacio determinado (urbano, de expansión rural o rural) encuentra por lo general obstáculos en los intereses económicos – ya sea debido a la instalación previa de actividades en el territorio que se planifica, ya sea por la especulación o intereses inmobiliarios de cara a nuevos desarrollos.

Para lograr una correcta ordenación del espacio territorial y urbano que permita a su vez una adecuada gestión de los riesgos resulta imprescindible desarrollar una cartografía de las áreas de riesgo (de inundación o de otra naturaleza) y derivar de ella una adecuada zonificación. Acciones que son distintas, aunque complementarias: la creación de mapas de riesgos de inundación consiste en identificar y caracterizar las áreas susceptibles, mientras que la zonificación permite definir los posibles usos, permitidos por ser compatibles con el riesgo y prohibidos.

En Brasil, un buen ejemplo del desarrollo de cartografía de riesgo de inundaciones se aprecia con motivo del desarrollo, a nivel nacional, del Mapa de Vulnerabilidad a Inundaciones por parte de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), disponible en el sitio web del Sistema de Información Nacional sobre Recursos Hídricos[1]:



Figura 1. Mapa de Vulnerabilidad a Inundaciones, Brasil. Fuente: ANA.

En el mismo portal está disponible el Atlas de Vulnerabilidad a Inundaciones de Rio Grande do Sul (ANA, 2014), donde se identifican 1.392 áreas inundables, 473 de las cuales (34%) son consideradas de alta vulnerabilidad a inundaciones graduales, 391 (28%) de vulnerabilidad media y 528 (38%) de baja vulnerabilidad. Respecto a la Cuenca Hidrográfica del Río dos Sinos se ve la siguiente situación:

[1] El Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) es uno de los instrumentos de la Ley Federal n. 9.433/97, que establece la Política Nacional de Recursos Hídricos en Brasil. Se trata de un extenso sistema de recolección, tratamiento, almacenamiento y recuperación de información sobre los recursos hídricos y los factores que intervienen para su gestión. La Agencia Nacional de Aguas (ANA) es la entidad federal responsable de la coordinación del Sistema Nacional de Gestión de Recursos de Agua (SINGREH) y SNIRH, tal como se estipula en el artículo 4, XIV, de la Ley Federal N° 9.984/00. http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=987367629d6a4bb18e876630347cec4a.



Figura 2. Aproximación para la Cuenca Hidrográfica del Río dos Sinos. Fuente: ANA.

La cartografía define los siguientes grados de vulnerabilidad:



Figura 3. Leyenda del Atlas de Vulnerabilidad a Inundaciones de Rio Grande do Sul. Fuente: ANA.

Estos mapas de riesgo de inundación ponen de manifiesto que la región de la cuenca hidrográfica en observación está sujeta a un alto riesgo de inundaciones, razón por la que resulta imprescindible la identificación completa de dichas áreas. Lamentablemente, el mapa actual apenas identifica parte de los cursos de agua sujetos a crecidas, no estando delimitadas las áreas afectadas por las inundaciones. A partir de ello, debería articularse la zonificación pertinente.

Ha de observarse, en su absoluta relevancia, que desde la promulgación de la Ley de Política Nacional de Protección y Defensa Civil (PNDEC), los municipios brasileños están obligados, en virtud del artículo 8° de la norma, a identificar y cartografiar las áreas de riesgo de desastres, sin que esta obligación esté condicionada a la implementación del registro nacional al que se refiere el artículo 6° o a regulaciones posteriores. Por lo tanto, desde la vigencia de la PNDEC (abril de 2012), los municipios deben elaborar los mapas de las áreas expuestas a inundaciones.

Independientemente de las acciones (o inacciones) de los municipios, en el ámbito de la Cuenca Hidrográfica del Río dos Sinos, en Rio Grande do Sul, la cartografía ya es, en parte, una realidad. La identificación de la llanura de inundación del canal principal del Rio dos Sinos y de algunos de sus afluentes fue llevada a efecto en el ámbito del "Estudio de alternativas y proyectos para minimizar el efecto de las crecidas en la cuenca del Rio dos Sinos", dirigido por el órgano metropolitano de planificación[2].

A partir de la conclusión de los estudios, el Ministerio Público de Rio Grande do Sul, a través de la Fiscalía Regional Ambiental de la Cuenca del Río dos Sinos, emitió una recomendación[3] a todos los municipios miembros de la cuenca, así como al órgano regional, para que se abstengan de conceder licencias ambientales, licencias para construir, u otras autorizaciones de uso del suelo (parcelación para habitación) dentro de los límites de la llanura de inundación del Rio dos Sinos o de sus afluentes, ya que se trata de un área considerada de alto riesgo de inundación. Además, los municipios de la cuenca también deben considerar las conclusiones del Estudio en cualquiera de las decisiones político-administrativas, así como adaptar sus leyes municipales a la nueva regulación regional.

De hecho, debido a la ausencia una ordenación territorial supramunicipal, a menudo se identifican conflictos entre las disposiciones municipales de planeamiento urbanístico y uso del suelo (leyes municipales) y las decisiones regionales adoptadas en el ámbito de la cuenca hidrográfica en la cual están insertados los municipios (plan de gestión la cuenca). El conflicto, sin embargo, es solamente aparente: la legislación municipal debe observar el plan de recursos hídricos correspondiente, por mucho que haya sido aprobado en un momento posterior y no tenga, *per se*, fuerza de ley. Esto es así porque la compatibilidad de los planes directores con el plan de la cuenca es exigida por la legislación federal, tanto por el artículo 31 de la Ley de Política Nacional de Recursos Hídricos, como por el Estatuto de la Ciudad (artículo 42-A, § 2º, introducido por la Ley de Política Nacional Protección y Defensa Civil).

La competencia municipal para la regulación del territorio ejercida a través del plan director no es por tanto absoluta, admitiendo las limitaciones derivadas de la concurrencia de competencias. De ahí la necesidad de coordinación entre los entes municipales y los otros entes de la federación brasileña – ya que la acción administrativa municipal de elaboración de los planes directores debe observar las zonificaciones ambientales (Ley Complementar n. 140/2011, art. 9º, IX), que en general están producidas por los estados y por la Unión Federal. La autonomía municipal, por consiguiente, no es absoluta, sufriendo restricciones y limitaciones aún en materia territorial y en la definición de los usos de la propiedad. Por otra parte, la cartografía de riesgo y los diagnósticos ambientales presentes en los planes de cuenca deben ser tenidos en cuenta por los planes directores urbanísticos, pudiendo suponer restricciones urbanísticas, con lo que inevitablemente conllevan una reducción de la discrecionalidad administrativa del municipio en su elaboración (Carvalho, 2017)[4].

Tras la reglamentación e implementación del registro nacional mencionado en el artículo 6°, VI, de

[2] Con fondos del Ministerio de las Ciudades, el resultado de los estudios contratados por la Fundación METROPLAN integra hoy día el Plan Metropolitano de Protección contra Crecidas. Los resultados, sin embargo, no están inmunes a críticas, razón por la cual el Ministerio Público abrió amplia discusión técnica sobre el tema, aún en curso.

[3] Ver noticia disponible en https://portal.camaranh.rs.gov.br/pm3/informacao_e_conhecimento/noticias/comitesinos-divulga-nota-sobre-mapeamento-da-planicie-de-inundacao-da-bacia-do-rio-dos-sinos. La recomendación puede ser consultada en http://www.comitesinos.com.br/arquivos/recomendacao-do-ministerio-publico-estadual-a-fepam-2019-04-29-1556579489.pdf.

[4] De la misma forma, en España, la jurisprudencia reconoce que los mapas tienen valor normativo y representan limitación de la discrecionalidad de la actividad de planeamiento, que se convierte en reglada y puede dar lugar a responsabilidad administrativa por actuación u omisión. Véase, por ejemplo, STSJ de Valencia número 235/2007, de 2 de febrero, y STS de 12 de mayo de 2011.

la PNDEC, cualquier falta de compatibilización del plan director con el plan de los recursos hídricos de la cuenca a la que el municipio pertenece podrá dar origen, además de responsabilidad personal del administrador público, a una demanda judicial para promover los ajustes necesarios en la legislación municipal. Mientras no sea ejecutado por la Unión el citado registro nacional, es posible con la normativa ya vigente prohibir la emisión de permisos ambientales y urbanísticos para actividades que sean realizadas en áreas de riesgo, así como deducir la responsabilidad civil del municipio por omisión en caso de un desastre – todo ello con base en el *conocimiento previo del riesgo* (siempre que el riesgo de desastres esté reconocido por planes de cuenca o por mapas de riesgo).

Se muestra por tanto imprescindible el desarrollo de una cartografía de zonas inundables, a los efectos de amparar con base técnica las decisiones político- administrativas sobre el uso del suelo. La cartografía de riesgos cumple por tanto una doble función, como instrumento de planificación territorial, y como elemento técnico para fundamentar decisiones judiciales derivadas de los daños producidos por las inundaciones.

2. EL DÉFICIT NORMATIVO BRASILEÑO Y LAS POSIBLES SOLUCIONES A LA LUZ DE LOS INSTRUMENTOS DEL DERECHO COMUNITARIO Y ESPAÑOL

La ausencia de instrumentos específicos para el control de los riesgos de inundaciones en Brasil, a diferencia de lo que ocurre en el Derecho comunitario y español, conlleva la frecuente utilización de construcciones jurídicas sectoriales para abordar el problema, lo que se realiza, por tanto, de manera indirecta. Ello obliga a una construcción jurídica un tanto forzada y a la necesaria intervención del Ministerio Público y el poder judicial para cubrir dichas lagunas.

En efecto, el ordenamiento jurídico brasileño permite dar respuesta a la problemática de los riesgos de inundación mediante la combinación de diversas disposiciones constitucionales con la legislación sectorial (notablemente de protección civil, urbanismo y medio ambiente). Se carece sin embargo de una norma de rango nacional de ordenación territorial que permita coordinar los diferentes textos normativos con impacto regulatorio en el territorio; tampoco se dispone de normas directamente diseñadas para afrontar el problema de las inundaciones.

Por ello, resulta de gran utilidad prestar atención a los instrumentos establecidos en la Directiva comunitaria de Inundaciones (Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre del 2007, sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación), así como en la legislación española derivada de sus disposiciones, tanto estatal como autonómica. Este marco jurídico sin duda puede contribuir a la mejora del ordenamiento jurídico brasileño en ese particular.

Entre los instrumentos normativos de mayor interés, extraemos los siguientes para su adaptación al ordenamiento brasileño: (1) establecimiento de la obligación de evaluar los riesgos de inundación en cada demarcación hidrográfica, teniendo por base las informaciones disponibles o fácilmente deducibles, incluyendo registros y estudios sobre la evolución a largo plazo y el impacto del cambio climático en la ocurrencia de inundaciones (fase 1); (2) elaboración de mapas de peligrosidad y mapas de riesgo (fase 2); (3) y, finalmente, presentación de planes de gestión de riesgos de inundación (fase 3). Todo ello dotaría a las administraciones públicas brasileñas de mejores instrumentos de control para afrontar este problema – tanto para la reducción de la probabilidad de ocurrencia de inundaciones como para la minimización de sus consecuencias.

En el ámbito del derecho interno español, antes de la transposición de la Directiva de Inundaciones, se contaba con importantes instrumentos de actuación que también merecen destacarse. De excepcional importancia fue la creación del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables

(SNCZI), por el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, definido como el conjunto de los estudios de inundabilidad realizados por el Ministerio de Medio Ambiente y sus organismos de cuencas hidrográficas, en colaboración con las Comunidades Autónomas y los gobiernos locales (municipales) afectados.

El citado Real Decreto trataba de dotar al derecho español de herramientas para la gestión de inundaciones, reconociendo las consecuencias dramáticas que estos eventos suponen en cuanto a la pérdida de vidas humanas y sus importantes repercusiones económicas. Importa poner de manifiesto que la cartografía producida en territorio como resultado de sus disposiciones es aún más minuciosa de lo requerido por la norma europea, integrando en la gestión del riesgo de inundaciones las normas internas relativas al agua, a la protección civil y también a la zona costera.

Por otra parte, el RD 638/2016 trató de perfeccionar el sistema, regulando las restricciones de uso del suelo y de desarrollo de actividades en áreas sensibles, en aras de encauzar el trabajo de ordenación del territorio a cargo de las comunidades autónomas, así como los desarrollos urbanísticos por las entidades locales.

La cartografía de las zonas inundables llevada a cabo por el SNCZI constituye una herramienta fundamental para la planificación y gestión de los riesgos de inundación, de conformidad con lo previsto por las normas europeas, y opera como una compilación de datos existentes en los diferentes niveles administrativos para la posterior elaboración de los mapas y planos requeridos por Directiva Europea de Inundaciones. El Plan Estatal de Inundaciones[5], por cierto, determina que el SNCZI actuará como base de datos sobre zonas inundables, según lo recomendado por la Directriz Básica de Protección Civil de 1995, siendo la referencia cartográfica para la evaluación y la delimitación de las zonas con riesgo de inundaciones.

Es ineludible reconocer que los mapas de riesgos naturales, en este particular, se convierten en verdaderos instrumentos jurídicos, ya que son herramientas de acreditación jurídica del riesgo natural. Según Jesús Conde Antequera (2015), el valor normativo y ejecutivo (no meramente consultivo) de esos mapas – que se deduce del estudio de la jurisprudencia española en la materia – se traduce en una limitación de la discrecionalidad de la actividad de planeamiento, que se convierte en reglada y puede dar lugar a responsabilidad administrativa por actuación u omisión.

Para la plena transposición de la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, fue dictado el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación (modificado por el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre).

Aunque esta norma haya dejado de regular las inundaciones causadas por los sistemas de drenaje (exclusión posibilitada por el artículo 2.1 de la DI), resulta aplicable a las inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos, arroyos de montaña y otras corrientes de agua continuas o intermitentes, así como las inundaciones en las zonas costeras y de transición[6].

De forma especial, los artículos 14 y 15 del RD 903/2010 acogen previsiones importantes sobre la integración de los planes de gestión de riesgo de inundación con otros planes, en particular con los planes hidrológicos (en Brasil denominados planes de gestión de recursos hídricos o simplemente

[5] Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones, aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros de 29 de julio de 2011, publicado por la Resolución de 2 de agosto de 2011, de la Subsecretaría. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-14277.

[6] Artículo 2 del Real Decreto 903/2010.

"planes de cuenca hidrográfica"), que deberán incorporar los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir los daños producidos por fenómenos hidrológicos (artículo 14). No se establece entre ambos planes una relación jerárquica, sino una llamada a su elaboración coordinada.
Los planes territoriales y urbanísticos que tengan influencia sobre las áreas inundables deberán sin embargo ser compatibles con las disposiciones de los planes de gestión del riesgo de inundación, lo que sí apunta a una relación jerárquica de subordinación de los primeros sobre los segundos. En cuanto a los planes de protección civil, estos deberán elaborarse de manera coordinada con los mapas de peligrosidad y riesgo y los planes de inundación (artículo 15).

La adopción de este tipo de instrumentos serviría a nuestro juicio para perfeccionar el sistema brasileño de cara a una efectiva gestión de riesgos de inundación, no solamente por la especificidad de las normas, sino también por dotar de coordinación y mayor integración al sistema general y sectorial – poniendo de manifiesto la jerarquía ejercida por los panes de inundaciones sobre la planificación territorial (Molina, 2010) y la existencia de una vinculación de la protección civil sobre el planeamiento urbanístico, ya que la identificación de áreas de riesgo conlleva limitaciones a la urbanización (Tardío Pato, 2008).

3. CONCLUSIÓN

Aun cuando en Brasil se dispone de una normativa general de rango constitucional muy garantista en orden a la protección de los derechos fundamentales, destacando el derecho fundamental al medio ambiente, la vida, dignidad de la persona, entre otros, todos ellos directamente relacionados con la protección del ciudadano frente a las inundaciones, el país carece de una normativa específica para afrontar estos riesgos, lo que resulta disfuncional. Es cierto que existe, por debajo de la Constitución, normativa sectorial que, desde el ámbito del medio ambiente, protección civil y urbanismo, puede aportar instrumentos útiles para minimizar los efectos de las inundaciones, pero la mayoría actúa como mecanismos reactivos en vez de preventivos, cuando el mejor enfoque para afrontar los riesgos de inundación es precisamente la prevención.

De ahí que los instrumentos establecidos en el derecho comunitario y español para prevenir inundaciones resulten del mayor interés para Brasil. Por ello hemos destacado en esta comunicación instrumentos como la cartografía de riesgos y la correspondiente planificación puesto que lo más eficaz es sin duda evitar que la población ocupe lugares expuestos a riesgos de inundación, siendo estos instrumentos claves para ello. Una vez la población ya está expuesta, las soluciones son siempre más costosas tanto en términos económicos como sociales y ambientales. Urge por tanto la aprobación en Brasil, y su puesta en ejecución, de toda una normativa específica sobre planificación y gestión del riesgo de inundaciones. Entre tanto, la aplicación de la actual normativa sectorial, con el soporte constitucional en los derechos fundamentales implicados, puede funcionar como un "parche" temporal, a la espera de contar con dichos desarrollos normativos.

REFERENCIAS

- Agência Nacional de Águas (2014). *Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Grande do Sul.* http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?uuid=e5cd6ea2-1ef6-46f9-8ec4-4f0b4bae35e8.
- Agência Nacional de Águas. *Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos. Mapa de Vulnerabilidade a Inundações.* http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=987367629d6a4bb18e876630347cec4a.
- Carvalho, D. W. (2017). O papel dos Planos de Bacia Hidrográfica na ordenação territorial sob a

ótica do Direito dos Desastres. En: FARBER, D.; CARVALHO, D. W. (org.), *Estudos aprofundados em Direito dos Desastres: Interfaces comparada,* 339-376. Editora Prismas, Curitiba.

- Conde Antequera, J. (2015). La responsabilidad de la administración por daños derivados de fenómenos naturales: especial referencia al riesgo de inundación. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 45-46, 82.
- METROPLAN (2018). *Plano Metropolitano de Proteção contra Cheias*. http://www.metroplan.rs.gov.br/conteudo/3241/?Metroplan_entrega_Plano_de_Prote%C3%A7%C3%A3o_Contra_Cheias_a_munic%C3%ADpios_da_Regi%C3%A3o_Metropolitana
- Molina Giménez, A. (2010). La disciplina territorial del riesgo de inundaciones en ordenamiento jurídico español. *Revista Aranzadi de Derecho Ambiental*, 18, 39-72.
- Tardío Pato, J. A. (2008). *La Gestión Urbanística en el Derecho de la Unión Europea, del Estado Español y de la Comunidad Valenciana*. Editorial Aranzadi, Cizur Menor.
- Tucci, C. E. M. (1997). Água no Meio Urbano. En: *Água Doce* (capítulo 14). http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outros_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-terrimorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/aguanomeio%20urbano.pdf.

EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE LA DIMENSIÓN SOCIAL Y LA PARTICIPACIÓN PÚBLICA EN LOS PLANES DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN: ¿CAMBIO O CONTINUIDAD PARADIGMÁTICA?

Ángela Olcina-Sala
Universidad de Alicante, España
os24@alu.ua.es

Guadalupe Ortiz
Departamento de Sociología I, Universidad de Alicante, España
guadalupe.ortiz@ua.es
https://orcid.org/0000-0002-5334-1322

Pablo Aznar-Crespo
Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales,
Universidad de Alicante, España
pablo.aznar@ua.es
https://orcid.org/0000-0001-9095-9044

RESUMEN

La investigación académica en torno al riesgo de inundación ha puesto de relieve, en las últimas décadas, la necesidad de integrar la dimensión social y procesos participativos en los modelos de gestión con el fin de superar las debilidades del enfoque tecnocrático dominante. Este trabajo tiene como objetivo conocer en qué medida se está produciendo una transición hacia nuevas formas de gestión pública más abiertas a soluciones no estructurales. En este sentido, se analizan los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) en España con el fin de evaluar el modo en que integran la atención a la dimensión social y la participación pública. El análisis de contenido documental de catorce PGRI revela una débil inclusión de medidas de carácter social, así como una baja calidad de los procesos participativos. Por consiguiente, argumentamos que la gestión del riesgo de inundación en España sigue reproduciendo características propias del paradigma tecnocrático.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de gobernanza medioambiental basado en el paradigma tecnocrático ha sido puesto en duda por los científicos sociales durante las últimas décadas. Tradicionalmente, el diagnóstico, definición y gestión de los riesgos medioambientales ha estado fundamentado de manera casi exclusiva en el conocimiento científico-técnico, evidenciando importantes deficiencias en la consideración de la racionalidad social y la aceptabilidad cultural. En esta línea, Beck (2002) apunta la necesidad de que el rígido y cerrado modelo tecnocrático se aproxime a perspectivas críticas y abiertas a través de la democratización de la relación entre ciencia y política. Esta demanda de transición epistemológica también se ha producido en el ámbito de la gestión del riesgo de desastre por inundación. Comúnmente, la gestión tecnocrática de las inundaciones se ha basado en: a) el manejo de cálculos probabilísticos para la predicción de los periodos de recurrencia de los episodios de inundación, expuestos a elevados niveles de incertidumbre (Ayala-Carcedo, 2002); y b) la

propuesta de soluciones ingenieriles para el control y regulación de las aguas de avenida y la defensa de zonas inundables (Brown & Damery, 2002; Few, 2003). Este enfoque, en lugar de actuar sobre las unidades de exposición para potenciar su respuesta adaptativa, se limita a intervenir los niveles de peligrosidad de la amenaza. Además de desatender las funciones ecosistémicas y omitir la dinámica fluvial del territorio (Ollero, 2010), este modelo de gestión ha ignorado tradicionalmente la influencia de los procesos y condiciones de vulnerabilidad social sobre la producción de riesgo de desastre por inundación (Birkmann et al., 2013). En consecuencia, los sistemas de gestión no han tenido la capacidad de atajar las causas estructurales del riesgo, así como tampoco de articular respuestas de mitigación efectiva de los impactos sociales producidos en escenarios de desastre. Esta gestión eminentemente reactiva del riesgo ha dado lugar a dinámicas de recuperación basadas en ciclos inefectivos de *desastre-reconstrucción-desastre* (Smith et al., 2011), los cuales constituyen un freno estructural para el fomento y articulación de territorios socio-económicamente resilientes.

El fracaso del modelo tecnocrático en el marco del cambio global ha favorecido la irrupción de nuevos criterios orientados a una *gestión adaptativa* del riesgo de desastre por inundación. (Shrubsole, 2007). Estos nuevos enfoques reivindican la necesidad de llevar a cabo una articulación de sistemas integrados de gestión, que combinen soluciones estructurales y no estructurales haciendo efectivo el principio de sostenibilidad socioambiental (Schoeman et al., 2014). Estas medidas no estructurales están orientadas a la recuperación del territorio fluvial mediante soluciones basadas en la naturaleza y a la capacitación social de las poblaciones locales a través de procesos de sensibilización y educación frente al riesgo. Para conseguir estos objetivos, resulta necesario orientar la toma de decisiones al beneficio de la comunidad, limitar la distribución desigual de los impactos, proteger el medioambiente y generar resiliencia económica (Werritty, 2006).

No obstante, pese a las demandas que se observan desde el mundo académico de transición a nuevos modelos de gestión socioambiental, no existe suficiente evidencia acumulada acerca del modo en que estos principios se están incorporando de manera práctica en el ámbito de la planificación y administración pública. Es por ello que este trabajo tiene como objetivo general evaluar el modo en que la gestión de riesgos por inundación, en el caso español, está incorporando de manera efectiva la atención a la dimensión social. Adoptamos para ello los marcos conceptuales de la vulnerabilidad social y de la participación pública.

Por un lado, la vulnerabilidad social se define el conjunto de condiciones sociales, económicas, políticas y culturales que determinan la capacidad de las personas, grupos y sistemas para hacer frente a las consecuencias negativas de eventos estresantes y recuperarse de los cambios que estos producen (Birkmann et al., 2013). La adopción de este enfoque en el ámbito del análisis y la gestión del riesgo de desastre por inundación permite anticipar las necesidades capacitivas de la población para prevenir el riesgo, afrontar los efectos de la amenaza y recuperarse de los impactos en escenarios de desastre.

En definitiva, este posicionamiento conceptual pone de manifiesto el papel proactivo que experimentan las unidades de exposición a la hora de afrontar el riesgo de desastre por inundación y sus potenciales impactos. Este enfoque reivindica que individuos y grupos sociales no juegan un mero papel pasivo como unidades indefensas receptoras de los impactos. Igualmente, desde el IPCC se señala la dimensión institucional y de gobernanza como un elemento más dentro de la vulnerabilidad social y se apunta la importancia de los procesos participativos públicos en la reducción de vulnerabilidad y el fomento de la capacidad de adaptación (Cardona et al., 2012). En esta línea, algunos autores han expuesto la necesidad de reforzar los sistemas de gobernanza del riesgo (Renn, 2008; Walker et al., 2010) mediante la ampliación de la red de actores que participan de la toma de decisiones y de las acciones de prevención y respuesta, dando así lugar a modelos de naturaleza más endógena y menos intervencionista (Kuhlicke et al., 2011). De este modo, la participación puede plantearse, no solo como vía de facilitación de procesos más democráticos, transparentes y de

incorporación de nuevos tipos de conocimiento (Raymond et al., 2010), sino también como un mecanismo de empoderamiento y de capacitación frente al riesgo de desastre por inundación. En este contexto, el presente trabajo busca comprender en qué medida han sido incorporados los nuevos criterios de gestión anteriormente descritos en la gestión de inundaciones. Con la finalidad de analizar el actual modelo de gestión del riesgo de desastre por inundación, y centrándonos en el caso español, nos remitimos a los *Planes de Gestión del Riesgo de Inundación* (en adelante, PGRI), el documento administrativo fundamental para la gestión de este tipo de desastres implementado bajo la Directiva Europea 2007/60[1] sobre Inundaciones. El objetivo de la presente investigación es evaluar la integración y tratamiento de los factores del ámbito social en los PGRI de cada demarcación hidrográfica española, centrándonos en las medidas aprobadas y en el proceso de participación llevado a cabo. En concreto, buscamos comprender si realmente los PGRI han incorporado criterios de gestión afines al nuevo paradigma de gestión del riesgo socioambiental.

2. METODOLOGÍA

El objeto de análisis del trabajo, tal y como se ha remarcado, son los PGRI españoles del primer ciclo ya aprobados, por lo que se ha seleccionado una muestra de los planes de las 14 demarcaciones hidrográficas peninsulares, a excepción de la D.H. de Cataluña debido a su falta de homogeneidad documental e información en comparación con el resto de PGRI. Específicamente, dentro de cada PGRI se han seleccionado dos documentos para su análisis: a) el anejo de «Descripción de programas de medidas», en el que se analizarán las medidas capacitadoras de carácter social; y b) el anejo de «Resumen de los procesos de información pública y consulta y sus resultados». Para el análisis de los documentos, se ha optado por un análisis de contenido documental de naturaleza cualitativa, basado en un procedimiento de codificación deductiva a partir de categorías conceptuales definidas previamente en la literatura especializada; y de codificación inductiva, con la creación de códigos mediante una revisión exhaustiva de los textos, guiada por los objetivos y preguntas de investigación. La realización de este procedimiento analítico se ha llevado a cabo mediante la herramienta informática Atlas.ti.

Debido a la gran cantidad de medidas y a la extensión del documento, se ha optado por establecer criterios de inclusión y exclusión para la selección de un número significativo de medidas en las que profundizar analíticamente. Tras la revisión de todas las medidas de cada uno de los documentos, se han seleccionado aquellas de marcado carácter social, siendo descartadas las que no reúnen este requisito. Por ello, el análisis se focaliza en las siguientes medidas dentro del PGRI: a) Elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación; b) Medidas para establecer o mejorar la planificación institucional de respuesta a emergencias de inundaciones a través de la coordinación con Planes de Protección Civil; c) Mejora de los protocolos de actuación y comunicación de la información relativa a inundaciones; d) Medidas para establecer o mejorar la conciencia pública en la preparación para las inundaciones, para incrementar la percepción del riesgo de inundación y de las estrategias de autoprotección en la población, los agentes sociales y económicos; y e) Planes de Protección Civil: acciones de apoyo a la salud, asistencia financiera, incluida asistencia legal, así como reubicación temporal de la población afectada. No obstante, para analizar en detalle las medidas sociales hemos seleccionado las «Actuaciones específicas» que las concretan. Para abordar el análisis de contenido, se han escogido dos modelos diferentes: uno para analizar las acciones comprendidas en las medidas; y otro para analizar el proceso participativo en su totalidad. En lo referido al análisis de las medidas, se ha utilizado el modelo de *Construcción de Capacidades Sociales* ante peligros naturales de Kuhlicke et al. (2011), en su adaptación a la Gestión de Riesgo de Inundación en España realizada por Ballester (2017). El modelo está formado por cinco dimensiones: Dimensión de conocimiento, Dimensión de motivación, Dimensión de redes,

[1] The EU Floods Directive. https://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/index.htm

Dimensión de participación y Dimensión de financiación. De este modo, en el marco del enfoque de la vulnerabilidad social, llevamos a cabo un análisis para conocer si estas dimensiones capacitivas se encuentran reflejadas en el programa de medidas de cada uno de los PGRI analizados en forma de acciones específicas. Sin embargo, asumiendo que los elementos sociales son difíciles de delimitar e identificar con precisión, se adopta una visión amplia y flexible de las medidas susceptibles de ser clasificadas como *sociales*. Se ha optado además por el empleo de un modelo de codificación adicional, bajo el clásico binomio Agencia/Estructura Social. Entendemos la Agencia como la disposición de las acciones a una mayor responsabilidad individual de la población afectada, así como un mayor empoderamiento de las capacidades para hacer frente al riesgo de inundación. Respecto a la Estructura, se concibe como las acciones desarrolladas en materia de acción institucional, a través de la creación de normativas y procedimientos de obligado cumplimiento para los actores sociales. Estas categorías nos permiten identificar la direccionalidad de la acción especificada en cada una de las acciones que componen las medidas.

En lo que se refiere al documento de los procesos de información pública y consulta, se ha abordado su análisis mediante el modelo de evaluación de la participación en la gestión del riesgo por inundación de Maskrey, Priest y Mount (2019). En él, los autores evalúan la calidad de los procesos participativos a partir de tres dimensiones principales: Contexto, Proceso y Resultados, siendo este último dividido en Resultados sustantivos y Resultados sociales. En primer lugar, el modelo de Maskrey et al. (2019) entiende el Contexto como la predisposición del tejido socio-institucional a la participación, explicitada en elementos como la comprensión del fenómeno de las inundaciones, el apoyo institucional, las interacciones previas entre *stakeholders* y la complejidad de la disputa. Por otro lado, el elemento de Proceso abarca las características comunes de los procesos participativos que repercuten colectivamente en la eficacia de la participación y contiene cinco subcategorías: Accesibilidad, Deliberación, Representación, Respuesta y Calidad. Por último, el Resultado social analiza la construcción de capacidades por parte de la comunidad para hacer frente a las inundaciones y mitigar la vulnerabilidad ante el riesgo tras el proceso participativo, cuyo análisis está sujeto al contenido de carácter social de las alegaciones que presenta cada uno de los participantes. No obstante, debemos indicar que la categoría de Resultado sustantivo ha sido descartada. Este elemento hace referencia al análisis de las percepciones y actitudes de los *stakeholders* respecto a las expectativas, objetivos y conflictos una vez finalizado el proceso participativo. De este modo, entendemos que la naturaleza y contenido de los documentos que han sido analizados impiden conocer estos aspectos.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados sobre medidas para la gestión del riesgo de inundación

El proceso analítico y la exposición de resultados dejan a la vista numerosos indicios que resuelven nuestra pregunta sobre en qué medida se están incluyendo la dimensión social y la participación pública en los PGRI españoles. La revisión de las medidas y el proceso de consulta revelan una acentuada debilidad de la integración de la dimensión social, así como un tratamiento superficial cuando ésta aparece tímidamente en los planes. En primer lugar, se observa una elevada similitud entre el conjunto de medidas de carácter social de cada uno de los documentos de medidas de las 14 demarcaciones hidrográficas analizadas. La semejanza es tan alta que en la mayoría de ocasiones las acciones se describen con las mismas palabras, de lo que se desprende la posibilidad de que exista un modelo genérico de referencia del que se extraen las medidas de contenido social sin el debido proceso de adaptación contextual. No obstante, aunque la mayoría de acciones de cada medida se repiten sucesivamente en todos los PGRI, se encuentran excepciones en algunos casos en los que se incluyen acciones adicionales formuladas exclusivamente para una demarcación hidrográfica concreta, como es el caso del Tajo, Cantábrico Oriental y Cantábrico Occidental. En este sentido, el análisis realizado demuestra una escasa profundización de las medidas sociales, así como la ausencia

de contextualización de las acciones propuestas en relación a las diferentes realidades sociales y culturales propias de cada demarcación hidrográfica.

		Mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación	Establecer o mejorar la planificación institucional de respuesta a emergencias	Mejora de los protocolos de actuación y comunicación	Conciencia pública, preparación, percepción del riesgo y autoprotección	Actividades de Protección Civil	Total
Construcción de Capacidades Sociales	Conocimiento	30	11	18	50	27	136
	Financiación	-	-	-	-	13	13
	Motivación	1	7	-	20	14	42
	Participación	-	-	-	2	-	2
	Redes	25	18	19	21	25	108
Orientación	Agencia		7	-	17	-	24
	Estructura	39	26	20	49	40	174

Tabla 1. Número de acciones según medidas sociales y categorías analíticas. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 1 ofrece los resultados del recuento del número de acciones para cada uno de los cinco tipos de medidas sociales analizados, según su naturaleza capacitiva y su orientación en términos de Agencia y Estructura. La dimensión de Conocimiento (136) es la más frecuente, seguida de Redes (108), Motivación (42), Financiación (13) y Participación (2). No obstante, debemos indicar que el sumatorio de elementos de todas las dimensiones del modelo de *Construcción de Capacidades Sociales* (301) no corresponde al total de acciones sociales encontradas en los documentos de medidas, puesto que algunas de ellas fueron clasificadas en más de una dimensión capacitiva. El número total de acciones sociales es de 179. Con todo, teniendo en cuenta que cada PGRI ofrece una media de 20 medidas y que sólo 5 de ellas pueden ser categorizadas como medidas de contenido social, es posible deducir el reducido peso proporcional de las acciones sociales sobre el conjunto. En cuanto a la orientación de las acciones, indicamos que la categoría de Estructura está notablemente más presente en el apartado de medidas que la Agencia, demostrando así la clara inclinación socioestructural en la elaboración de medidas frente a actuaciones orientadas a la capacitación individual de las poblaciones afectadas -que adquieren un papel de receptoras pasivas-, incluso en el caso de medidas orientadas a la generación de conocimiento sobre el riesgo.

La dimensión de Conocimiento se concreta, de manera general, a través de acciones dirigidas a la

elaboración, mejora y difusión del conocimiento sobre el riesgo de inundación y protocolos de actuación. Se trata de acciones que parten de la responsabilidad institucional y que, además, inciden en la divulgación de información sobre autoprotección y pautas sanitarias para la población. No obstante, no se observa una implicación directa por parte de las instituciones a la hora de afianzar un conocimiento sólido y extendido a la población, pues solamente se hace referencia a campañas o páginas web, sin el desarrollo acciones que requieran de la comunicación fluida e implicación directa de la población. En lo que se refiere a la dimensión Redes, las acciones están encaminadas a una mayor coordinación y cooperación entre las autoridades responsables, así como al refuerzo del sistema de actores mediante campañas de difusión de información. Este elemento refuerza el carácter socioestructural de las medidas, pues la categoría evidencia un mayor esfuerzo por la construcción de capital social entre autoridades y, por el contrario, un tratamiento residual de las redes de actores afectados por las inundaciones. Por otro lado, las acciones categorizadas dentro de la dimensión Motivación están estrechamente vinculadas a la Agencia, sobre todo mediante la difusión de pautas de comportamientos individuales de autoprotección. La categoría de Financiación es, en sí misma, una clara evidencia de la escasa integración de la dimensión social en las medidas del PGRI: por un lado, solo aparece una acción de este tipo, relacionada con las ayudas y subvenciones para la recuperación de los daños, y cuya redacción se repite literalmente en 13 de los 14 PGRI analizados; y por otro lado, su escaso tratamiento, tanto en su frecuencia como nivel de desarrollo, indica la ausencia de apoyo económico explicitado para la realización de aquellas acciones que van más allá de la pura labor técnica. Por último, siendo la categoría más residual, la dimensión de Participación solamente aparece en los PGRI de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental y Cantábrico Occidental, cuyas acciones categorizadas hacen referencia a la elaboración de talleres participativos y encuestas. En efecto, la ausencia de la dimensión de Participación en las medidas vuelve a retratar los PGRI españoles como un modelo de gestión dirigido a la elaboración de medidas estructurales, rígidas y basadas en un modelo de toma de decisiones arriba-abajo que no facilita el establecimiento de relaciones de colaboración con las poblaciones afectadas.

3.2. Resultados sobre participación pública

El análisis de las categorías Contexto y Proceso (integrado a su vez por las subcategorías Accesibilidad, Deliberación, Representación, Respuesta y Calidad) ha puesto de manifiesto la ausencia de información detallada que informe de estas categorías analíticas, que se ve además reforzada por la ya comentada rigidez y homogeneidad de los documentos. Por este motivo, se ha optado por realizar un análisis descriptivo general de estas categorías, orientadas a la elaboración de un tipo ideal que permita caracterizar la naturaleza de la participación pública en los PGRI españoles, en lugar de un sistema de codificación sistemática y conteo de códigos como el utilizado en el análisis de medidas y acciones. Sí que ha sido posible adoptar esta estrategia de codificación inductiva en el caso de la subcategoría «Representatividad», dado que los documentos ofrecían los listados de actores sociales que hacían posible esta tarea.

En relación a la información que los PGRI ofrecen acerca del Contexto que da lugar a sus procesos participativos, ésta se reduce a las referencias a la legislación aplicable, concretamente el Real Decreto 903/2010 del 9 de julio, constatándose de nuevo una importante ausencia de adecuación al entorno social y cultural particular de cada región, en tanto que el mismo proceso participativo se aplica en cada una de las demarcaciones hidrográficas. En lo que se refiere al Proceso, la revisión de los documentos ha evidenciado la debilidad de la participación a través de las cinco subcategorías. En primer lugar, argumentamos que la Accesibilidad en el proceso participativo de los PGRI es baja, en tanto que no se observan unos claros protocolos de fomento y divulgación de la participación ni el número de participantes en algunos casos es alto. En segundo lugar, el nivel de Deliberación también es bajo, pues se limita al intercambio de conocimiento bidireccional entre la parte interesada y la administración, y no permite la participación o información de un tercer actor. El proceso participativo, que se lleva a cabo mediante el envío burocratizado de documentos, solo permite una

intervención y la respuesta posterior de la autoridad competente, sin dar lugar a espacios de debate o intercambio fluido de conocimiento. En relación al análisis de la subcategoría de Respuesta, la participación en los PGRI demuestra ser un procedimiento rígido que se limita a la aplicación mínima de las exigencias establecidas en la legislación, que no da pie a la flexibilización de la acción participativa ni a la adaptación a la agenda y objetivos de los participantes. En último lugar, dado que la subcategoría de Calidad hace referencia a la profesionalidad, la claridad en los objetivos del proceso y el conocimiento por parte de los participantes sobre qué es lo que se espera de su aportación, podemos hablar de una Calidad alta, en tanto que la formalidad y la naturaleza oficial-administrativa de los documentos permiten garantizar un proceso participativo profesional con un objetivo claro. En términos generales, entendemos que la participación en los PGRI se caracteriza por la rigidez y superficialidad, apenas permitiendo el intercambio de conocimiento y el debate sobre las cuestiones clave del PGRI. Asimismo, los procesos participativos muestran idénticas características para todas las demarcaciones hidrográficas, no consiguiendo adaptar y flexibilizar su procedimiento y herramienta para las diferentes realidades sociales y culturales del territorio español.

En lo que se refiere a la Representatividad, tal y como observamos en la Tabla 2, hemos encontrado una amplia variedad de actores, con una presencia significativamente mayor de Empresas, Organismos públicos autonómicos y Ayuntamientos. Pese a ello, consideramos que la representatividad en la participación que se desarrolla en el marco de los PGRI es relativamente baja. Considerando la extensión de cada demarcación hidrográfica, quedan fuera del procedimiento muchos actores sociales en la escala local e infralocal, especialmente representantes de asociaciones ciudadanas, sectores ajenos al sistema institucional-administrativo de carácter oficial o individuos con intereses particulares. Encontramos así que las instituciones públicas a nivel local, comarcal, autonómico y estatal que participan en el proceso son, en conjunto, la categoría más representada.

Este hecho puede estar poniendo de manifiesto la dudosa difusión de la apertura del proceso de alegaciones, así como el fomento por parte de las autoridades responsables de una mayor implicación de la ciudadanía en la participación para el diseño y aprobación del PGRI.

	Total	Resultado social
Asociaciones de vecinos	5	-
Asociaciones ecologistas	10	4
Asociaciones profesionales	8	2
Ayuntamientos	22	-
Colegios profesionales	3	3
Empresas	58	3
Fundaciones medioambientales	1	1
Institutos y centros de investigación	6	-
ONG	11	3
Organismos públicos autonómicos	47	4
Organismos públicos comarcales	6	-
Organismos públicos estatales	3	-
Particulares	12	2
Partidos políticos	2	1

Tabla 2. Número total de apariciones de actores sociales y número de alegaciones relativas a Resultados Sociales según actor en los documentos de «Resumen de los procesos de información pública y consulta y sus resultados». Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en el caso de la categoría de Resultado social debemos destacar la ausencia de este tipo de contenido -como habría sido esperable- en las alegaciones por parte de instituciones públicas que

representan el interés general de la sociedad, como es el caso de ayuntamientos, gobiernos autonómicos o estatales e incluso partidos políticos. La mayoría de estas alegaciones hacen referencia a la necesidad de generar una mayor concienciación sobre el riesgo de inundación y fomentar actuaciones de autoprotección, ambas medidas basadas en la responsabilidad individual de la población. Apenas se encuentran aportaciones referidas a la implicación activa de la población a través de procesos de mayor calado participativo.

4. CONCLUSIONES

Atendiendo al objetivo principal de este trabajo, se puede concluir que los PGRI españoles integran de forma residual y superficial la dimensión social en su diseño de medidas de actuación. Asimismo, estos llevan a cabo procesos participativos débiles que no consiguen democratizar de manera efectiva la gestión pública del riesgo de desastre por inundación, ni incluir adecuadamente los intereses sociales de los actores involucrados en las estrategias de gestión. Por el contrario, se evidencia un proceso administrativo con una elevada rigidez burocrática que se reproduce de manera estandarizada y descontextualizada en cada demarcación hidrográfica.

Tal y como se indicaba en anteriores epígrafes, este trabajo ha adoptado el enfoque de la vulnerabilidad social para abordar la evaluación de la integración de la dimensión social en los PGRI. Tanto el análisis de las medidas como el del Resultado social del proceso de participación han evidenciado la ausencia de una firme voluntad por parte de la administración por profundizar y mejorar la construcción de capacidades sociales como fórmula para potenciar la respuesta adaptativa de la población y hacer frente de forma proactiva al riesgo de desastre por inundación. Este hallazgo se explicita de manera clara, no solamente en el reducido número de medidas sociales incluidas, sino también en la notable inconsistencia de su contenido. Si bien estas medidas parecen estar encaminadas hacia un cierto intento de superación de la tradicional exclusividad de las soluciones estructurales, a su vez estas adolecen de una escasa materialización en acciones concretas impulsadas mediante incentivos económicos, técnicos y sociales. Por el contrario, las medidas estructurales sí presentan el nivel de concreción necesario para su puesta en práctica, evidenciándose la persistencia y ausencia de cuestionamiento del tradicional paradigma tecnocrático en el que las medidas de prevención, respuesta y recuperación se basan principalmente en soluciones de carácter técnico. De este modo, es posible concluir que la gestión del riesgo de desastre por inundación en España es un claro ejemplo del *science-policy gap*: mientras que la producción científica ha puesto de relieve la necesidad de incluir la dimensión social y la participación pública para un tratamiento más eficaz de los peligros naturales, la gestión pública sigue reproduciendo el paradigma tecnocrático dominante, que se ha demostrado insuficiente y obsoleto. Así pues, entendemos que la reformulación de la relación sociedad-medio ambiente se está dando en el plano académico y teórico, pero es aún incapaz de infiltrarse en la práctica de la elaboración de políticas medioambientales. Pese a que algunos organismos e instituciones supralocales de referencia, como la Agencia Europea de Medio Ambiente (2011) o la UNDRR (2015), han señalado la necesidad de adoptar enfoques más proactivos e integrales que permitan una mejor comprensión y abordaje de los riesgos socioambientales, la inclusión de medidas no estructurales en los sistemas y mecanismos locales de gestión es finalmente vaga, imprecisa y superficial. En definitiva, ante la pregunta de si nos encontramos ante un momento de cambio o de continuidad paradigmática, argumentamos que resulta evidente la reproducción y continuidad del paradigma tecnocrático dominante, con una vaga y residual aplicación de acciones y estrategias concretas que materialicen las demandas que se producen desde el plano teórico y académico hacia nuevos modelos más integradores.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del *Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario* (FPU) del Ministerio de Universidades español, a partir de la subvención concedida al tercer autor de este trabajo.

REFERENCIAS

- Agencia Europea de Medio Ambiente (2011). *Disasters in Europe: more frequent and causing more damage*. https://www.eea.europa.eu/highlights/natural-hazards-and-technological-accidents
- Ayala-Carcedo, F. J. (2002). El sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos. Un análisis del caso español y sus alternativas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 33, 79-92.
- Ballester, A. (2017). *Participación pública para una gestión eficaz del riesgo por inundación: construcción de capacidades sociales en la Ribera Alta del Ebro (España)*. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Beck, U. (2002). *La sociedad del riesgo global*. Madrid: Siglo Veintiuno.
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., ... and Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural hazards*, 67(2), 193-211.
- Brown, J. D. and Damery, S. L. (2002). Managing flood risk in the UK: Towards an integration of social and technical perspectives. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 27(4), 412-426.
- Cardona, O. D., Van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., Mc Gregor, G., Rosa, P., …and Thomalla, F. (2012*). Determinants of risk: Exposure and vulnerability*. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Few, R. (2003). Flooding, vulnerability and coping strategies: local responses to a global threat. *Progress in Development Studies*, 3(1), 43-58.
- Kuhlicke, C., Steinführer, A., Begg, C., Bianchizza, C., Bründl, M., Buchecker, M., … and Faulkner, H. (2011). Perspectives on social capacity building for natural hazards: Outlining an emerging field of research and practice in Europe. *Environmental Science and Policy*, *14*(7), 804-814.
- Maskrey, S. A., Priest, S. and Mount, N. J. (2019). Towards evaluation criteria in participatory flood risk management. *Journal of Flood Risk Management*, *12*(2).
- Ollero, A. (2010). Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117(3-4), 247-260.
- Raymond, C. M., Fazey, I., Reed, M. S., Stringer, L. C., Robinson, G. M. and Evely, A. C. (2010). Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *Journal of Environmental Management*, *91*(8), 1766-1777.
- Renn, O. (2008). *Risk Governance: Coping with uncertainty in a complex world.* Earthscan, London.
- Schoeman, J., Allan, C. and Finlayson, C. M. (2014). A new paradigm for water? A comparative review of integrated, adaptive and ecosystem-based water management in the Anthropocene. *International Journal of Water Resources Development*, 30(3), 377-390.
- Shrubsole, D. (2007). From structures to sustainability: A history of flood management strategies in Canada. *International Journal of Emergency Management*, 4(2), 183-196.
- Smith, W., Davies-Colley, C., Mackay, A. and Bankoff, G. (2011). Social impact of the 2004 Manawatu floods and the "hollowing out" of rural New Zealand. *Disasters*, *35*(3), 540-553.
- UNDRR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.*

Resolución Aprobada Por La Asamblea General El 3 de junio de 2015. http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf

- Walker, G., Whittle, R., Medd, W. and Watson, N. (2010). *Risk governance and natural hazards*. CapHaz-Net WP2 Report. Lancaster Environment Centre, University Lancaster.
- Werritty, A. (2006). Sustainable flood management: Oxymoron or new paradigm?.*Area*, *38* (1), 16-23.

RESPONSABILIDAD ADMINISTRATIVA DE LOS ENTES LOCALES POR FALTA DE MANTENIMIENTO O INDADECUACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE SANEAMIENTO Y ALCANTARILLADO

Belén Burgos Garrido
Departamento de Derecho Administrativo, Universidad de Granada, España
belenburgos@ugr.es
https://orcid.org/0000-0002-3519-0196

RESUMEN

La fuerza de la naturaleza con frecuencia ocasiona inundaciones que a su vez provocan numerosos daños. Sin embargo, no todos estos sucesos son siempre inevitables, sino que algunos serán consecuencia de la falta de diligencia de la Administración Pública en sus deberes de cuidado y mantenimiento de las infraestructuras que les competen, en cuyo caso, se podrá apreciar su responsabilidad patrimonial. El presente trabajo analiza, a través de un recorrido jurisprudencial casuístico, los presupuestos tradicionales de la responsabilidad bajo el prisma de las inundaciones urbanas.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son sucesos capaces de ocasionar importantes daños[1] tanto personales como materiales y, por ello, han sido objeto de atención del legislador. En este sentido, no en vano, tal y como indica Melgarejo Moreno (2001), el verdadero origen del Derecho de aguas y de la política hidráulica en España tuvo lugar, en gran medida, ante la necesidad de luchar contra las inundaciones[2]. No obstante, actualmente, ante el cambio climático, que conlleva la proliferación de estos fenómenos, se torna aún más acuciante enfrentarse a estos episodios a través tanto de la planificación hidrológica como de adecuación de las infraestructuras de evacuación de las aguas, a fin de que se produzcan los menores daños posibles.

Es por ello, que no todas las inundaciones y, consecuentemente sus daños, son inevitables, sino que habremos de atender a las circunstancias de producción en cada caso concreto, sobre todo para determinar la posible existencia de responsabilidad por parte de los poderes públicos. Esa responsabilidad puede deberse a diversas causas, como por ejemplo: a la falta de previsión del riego natural en el planeamiento al no elaborarse los mapas de riesgo naturales, tal y como apunta Conde

[1] Sobre los daños por inundaciones *vid*. García Gándara, C. (2013). *Evolución temporal de la frecuencia, magnitud y daños por inundaciones, e identificación de los factores determinantes*, Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria, https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/3181

[2] Melgarejo Moreno, J. (2001). "El visionario proyecto contra las avenidas de R. García y L. Gaztelu. Más de un siglo de vigencia", en *Proyecto de obras de defensa contra las inundaciones en el valle del Segura*, obra colectiva, editada por el autor, Ministerio de Medio Ambiente, Confederación hidrográfica del Segura, Murcia, pp. 561-589.

Antequera[3]; al permitir construcciones en zonas de riesgo, como por ejemplo en el cauce de un río[4]; a la existencia de redes unitarias que recogen tanto aguas pluviales como residuales, lo que aminora su capacidad de drenaje o de niveles freáticos muy superficiales, lo que fuerza a diseñar redes de saneamiento con poca pendiente, como indica Molina Giménez[5]; finalmente, la responsabilidad administrativa también puede derivar de la falta de mantenimiento o inadecuación de las instalaciones de saneamiento por parte de los Entes Locales, cuestión esta última en la que nos vamos a centrar.

2. LA RESPONSABILIDAD PATRIMONIAL EN LAS INUNDACIONES URBANAS

Como es sabido, el principio de responsabilidad patrimonial de la Administración tiene su base en el principio genérico de la tutela efectiva que en el ejercicio de los derechos e intereses legítimos reconoce el art. 24 CE, y, de modo específico, en los arts. 9.3 y 106.2 de la CE, de modo que la Administración de un lado, se convierte en garante de ese principio y, de otro, proclama el derecho de los particulares a ser indemnizados por toda lesión que sufran en cualquiera de sus bienes y derechos, salvo en los casos de fuerza mayor, siempre que la lesión sea consecuencia del funcionamiento de los servicios públicos[6]. Dicho esto, en el presente trabajo vamos a centramos en el análisis de los requisitos de la responsabilidad patrimonial en contextos de inundaciones urbanas.

2.1. Presupuestos de la responsabilidad patrimonial en relación con las inundaciones urbanas

La jurisprudencia viene exigiendo diversos requisitos como presupuestos de la responsabilidad patrimonial de las Administraciones públicas (*Vid*. STS de 23 de enero de 2012). Más que un análisis doctrinal pormenorizado de estos requisitos genéricos, lo que pretendemos en esta sede es exponer cómo son interpretados por la jurisprudencia en supuestos de inundaciones urbanas. Dicho esto, para que nazca responsabilidad patrimonial en supuestos de inundaciones urbanas se exige:

1º) La existencia de un daño efectivo, evaluable económicamente e individualizado en relación a una persona o grupo de personas. Algunas sentencias lo definen como a existencia de una lesión real y concreta.
Esto supone además que no es posible plantearse la posible concurrencia de la responsabilidad patrimonial de la Administración si no se ha producido efectivamente un daño real[7].
En los supuestos que vamos a analizar estos daños van a consistir en daños materiales, personales y morales provocados por una inundación urbana.

2º) El daño ha de ser antijurídico, en el sentido de que la persona que lo padezca no tenga el deber jurídico de soportarlo, conforme a la Ley.

---

[3] Para este autor, es destacable "el valor normativo, y no meramente consultivo, del mapa de riesgos". Conde Antequera, J. (2015). "La responsabilidad de la Administración por daños derivados de fenómenos naturales: especial referencia al riesgo de inundación", *Revista Aragonesa de Administración Pública*, núm. 45-46, 82. En este sentido, hemos de recordar que ya desde el Texto Refundido de la Ley del Suelo 2/2008, de 20 de junio se exigía la inclusión de estos mapas en el informe de sostenibilidad ambiental (art. 15.2); obligación que se mantienen en el vigente Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana (art. 22.2)

[4] En este caso la responsabilidad se fundamentaría sobre el incumplimiento del deber de policía demanial.

[5] MOLINA GIMÉNEZ, G.: *La disciplina territorial del riesgo de inundaciones en el ordenamiento jurídico español*, en Revista Aranzadi de Derecho Ambiental núm.18, 2010, p. 3 en Aranzadi digital, pp. 39 a 72 en la revista impresa.

[6] *Vid*. al respecto SSTS, Sala 3ª, de 11 de abril de 2006, 3 de mayo de 2011, 14 de noviembre de 2011. SAN (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 159/2016, de 3 diciembre, STSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 2751/2012, de 22 octubre.

[7] En relación con esto, recuerda la STS de 1 de febrero de 2012, que "la existencia de un daño real y efectivo, no traducible en meras especulaciones o expectativas, constituye el núcleo esencial de la responsabilidad patrimonial traducible en una indemnización económica individualizada, de tal manera que resulte lesionado el ámbito patrimonial del interesado que es quién a su vez ha de soportar la carga de la prueba de la realidad del daño efectivamente causado".

En este sentido, hemos de tener presente que el art. 54 de la LBRL, determina que las Entidades Locales deberán responder directamente de los daños y perjuicios provocados a los particulares en sus bienes y derechos como consecuencia del funcionamiento de los servicios públicos remitiendo para el enjuiciamiento de estas pretensiones a la legislación general sobre responsabilidad administrativa. Y, por su parte, el Real Decreto 2568/1986, de 28 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de organización, funcionamiento y régimen jurídico de las Entidades Locales, estipula, en su art. 223 que "las entidades Locales responderán directamente de los daños y perjuicios causados a los particulares en sus bienes y derechos como consecuencia del funcionamiento de los servicios públicos o de la actuación, en ejercicio de sus cargos, de sus autoridades, funcionarios o agentes, en los términos establecidos en la legislación general sobre responsabilidad administrativa."

3º) Que haya una relación de causalidad, es decir, una relación de causa-efecto entre la actividad administrativa y el resultado dañoso, o lo que es lo mismo la existencia de nexo causal que implica la necesidad de que el daño sea consecuencia del funcionamiento normal o anormal (es indiferente la calificación) de un servicio público o actividad administrativa en relación directa, inmediata y exclusiva. Ello va en consonancia con la máxima de que "las Administraciones Públicas no son aseguradoras universales de todos los riesgos con el fin de prevenir cualquier eventualidad desfavorable o dañosa para los administrados que pueda producirse con independencia del actuar administrativo. Por ello, para que el daño resulte imputable a la Administración será necesario que entre la actuación administrativa y dicho daño medie una relación de causa a efecto". (Dictamen del Consejo Consultivo de la Comunidad de Madrid núm. 38/2013, de 6 de febrero en relación con un supuesto de responsabilidad administrativa como consecuencia de filtraciones de agua desde el alcantarillado público).

Sin embargo, hemos de destacar que "esta exclusividad del nexo causal ha sido matizada por la doctrina jurisprudencial más reciente, en la que, sin establecer reglas generales, se han tomado en consideración las circunstancias objetivas de cada caso, admitiendo la posibilidad de que la injerencia de un tercero o del propio lesionado no produzca una ruptura de la relación de causalidad, sino una concurrencia de causas que pudiera incluso dar lugar a la graduación del quantum indemnizatorio que, en su caso, deba abonar la Administración." (STSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 2751/2012, de 22 octubre).

En este punto, en los supuestos de inundaciones urbanas, el funcionamiento normal o anormal entendemos que vendrá determinado por el cumplimiento o incumplimiento de la obligación de mantenimiento y adecuación de las instalaciones de saneamiento y alcantarillado que reside en los Entes Locales por mandato de la Ley 7/1985, de 2 de abril, de Bases de Régimen Local (LBRL). Esta ley estipula, en su art. 25.2.c LBRL, que los Ayuntamientos serán los competentes, en los términos de la legislación del Estado y de las CC.AA., para la evacuación y tratamiento de aguas residuales. Asimismo, en su art. 26 LBRL ordena que, en todos los municipios se deberá prestar, el servicio de alcantarillado. Tal y como vamos a analizar, la falta de observancia de estos preceptos, puede derivar en responsabilidad patrimonial de la Administración municipal.

Así, por ejemplo, en la STSJ de Valencia, (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1092/2007, de 3 septiembre, en el que se aprecia responsabilidad patrimonial por los daños en un restaurante por inundación debida a la crecida de aguas en el alcantarillado público y la falta de funcionamiento de las estaciones de bombeo, por ausencia de fluido eléctrico.

Otro supuesto, no por falta de mantenimiento, sino por prestación inadecuada del servicio, lo constituye la STSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1057/2009, de 13 julio, donde se declara la responsabilidad patrimonial del Ayuntamiento en una inundación producida en un local de negocio al demostrarse la insuficiencia de los desagües de la red

general de alcantarillado al ser su diámetro inferior al necesario para la evacuación de las aguas que debían recibir, lo que provocó que las aguas residuales rebosaran por la arqueta, inundando el local y ocasionando los daños.

No obstante, como decíamos es fundamental la existencia del nexo causal de modo que su inexistencia o ruptura supondrá que la Administración se vea exonerada de responsabilidad. En este sentido, podemos citar como ejemplo la STSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 494/2008, de 21 abril, que analiza un supuesto donde no aprecia responsabilidad del Ente Local al considerar que no existe el necesario nexo causal, entre los daños efectivos y reales causados en una vivienda debido a una inundación y la actuación de la Administración en la ejecución de la red de saneamiento; todo ello, al no quedar acreditado que existiese negligencia alguna en su mantenimiento y limpieza. En concreto, se trataba de un caso donde la vivienda sufrió una inundación debido a las lluvias al rebosar los sumideros que existían dentro de dicha propiedad y que están directamente conectados con la tubería principal, pero se daba la circunstancia, según quedó acreditado con el informe del Arquitecto Técnico del Ayuntamiento, que la vivienda objeto de los daños, existía antes de la urbanización que proveyó de sistema de evacuación de aguas a toda la zona y que el sumidero de la vivienda conectaba casi de forma horizontal a la red general de saneamiento, en la cota más baja posible del pozo de registro situado frente a la vivienda, al encontrarse la misma muy por debajo de la rasante de la calle, lo que originaba que en días de abundante lluvia el agua de la red general de saneamiento entrase en la vivienda. En base a ello, el Ayuntamiento alega que la inundación no se produce por funcionamiento anormal de la Administración. Efectivamente, así lo estima el tribunal al considerar que el motivo de la inundación de la vivienda "fue la deficiente instalación de acometida de las aguas residuales a la red general de alcantarillado, que fue ejecutada con posterioridad a la instalación de la casa y en su consecuencia, en lugar de proceder al bombeo de aguas residuales para verterlas en el pozo recolector, a una altura suficiente, para que la conexión de la vivienda a la red de saneamiento, se efectuara con una pendiente adecuada a fin de evitar inundaciones o rebosamientos como el ocurrido, siendo cuenta del administrado adecuar la instalación a la configuración de la red de saneamiento que el Ayuntamiento diseñó y ejecutó en función a las características del terreno aprovechando su pendiente, por lo tanto, siendo el motivo de la inundación la peculiar estructura de la vivienda, […], siendo obligación del actor realizar la adecuada conexión." STSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 494/2008, de 21 abril, FJ, 3º.

Asimismo, en relación con el nexo de causalidad en supuestos de inundación, la STSJ de Asturias, (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 986/2006, de 31 mayo, estudia un caso donde se produce la inundación de un local comercial por el deficiente estado de la tubería de saneamiento en el terreno que discurre desde el interior del patio del edifico hasta la arqueta de saneamiento de la red. Resulta interesante en esta sentencia el tema de la determinación de la titularidad de la tubería en la que se produjo la obstrucción causadora de la inundación, pues ello, aclara el tribunal es fundamental para la concurrencia o no del requisito del nexo causal. En este sentido, entiende el tribunal, en su FJ 5º, que "la regla general es que la red de saneamiento de titularidad municipal comienza a partir de las arquetas ubicadas en la vía pública y que los enganches que discurren hasta la misma pertenecen a las comunidades de los edificios correspondientes, […] es por todo ello por lo que no puede considerarse que el daño se haya producido como consecuencia de la actividad o inactividad del Ayuntamiento y que, por tanto, tampoco está suficientemente acreditada la concurrencia del nexo de causalidad."

A sensu contrario, en los supuestos donde la titularidad de la tubería es pública sí puede apreciarse responsabilidad, así en la TSJ de Castilla y León, Valladolid (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1766/2008, de 18 julio, se indica que "el túnel de desagüe del patio de la vivienda del actor es una canalización titularidad del Ayuntamiento demandado a quien le corresponde su

conservación y mantenimiento." Declarándose, por tanto, la existencia del nexo causal y la responsabilidad de la Administración municipal.

4º) Ausencia de fuerza mayor. En relación con este requisito, la doctrina jurisprudencial lo ha definido "como aquel evento imprevisto e irresistible, de tal forma que dicho evento era difícilmente previsible pero que, aunque previsible, sería inevitable; en el ámbito administrativo se añade además la nota de ajenidad del servicio, en el sentido que sólo es fuerza mayor aquel evento exterior al funcionamiento de los servicios en cuyo seno surge la lesión. La fuerza mayor es un concepto jurídico que debe quedar ceñido, como reiteradamente ha repetido la jurisprudencia del Tribunal Supremo, al suceso que está fuera del círculo de actuación obligado, que no hubiera podido preverse o que previsto fuese inevitable, como guerras, terremotos, fenómenos atmosféricos extraordinarios8, etc., pero no pueden incluirse aquellos eventos que se encuentran dentro de la actuación o del funcionamiento de los servicios públicos." (STSJ de Extremadura, (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1092/2003, de 14 julio, FJ 4º).

No obstante, tal como viene reiterando el Tribunal Supremo, la fuerza mayor en cuanto exoneradora de la responsabilidad patrimonial, no sólo exige que obedezca a un acontecimiento que sea imprevisible e inevitable, como el caso fortuito, sino también que tenga su origen en una fuerza irresistible extraña al ámbito de actuación del agente (SSTS, entre otras, de 30 de septiembre de 1995, 18 de diciembre de 1995, 6 de febrero de 1996, 31 de octubre 2006 y 26 de abril 2007).

No basta invocar dicha situación por parte de los poderes públicos para ver eximida su responsabilidad, sino que ha de probarse la misma. En este sentido, la carga de acreditar la concurrencia de fuerza mayor corresponde a la Administración. Y ello, porque tal y como pone de manifiesto la STS (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección6ª), de 15 diciembre 1997, "la prueba para considerar roto el nexo de causalidad, corresponde a la Administración, pues no sería objetiva aquella responsabilidad que exigiese demostrar que la Administración que causó el daño procedió con negligencia, ni aquélla cuyo reconocimiento estuviere condicionado a probar que quien padeció el perjuicio actuó con prudencia" En análogo sentido, las SSTS (ambas de la Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección6ª), de 15 marzo 1999 y de 6 abril 1999.

Por lo que respecta a la temática concreta que nos ocupa, la SAN (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 159/2016, de 3 diciembre, en su FJ 7º, así lo reconoce. Igualmente, la STSJ de Castilla y León, Valladolid (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1766/2008, de 18 julio, que en un supuesto donde se discute si la inundación ocasionada en una vivienda fue causa de la obstrucción en alcantarillado de las redes de saneamiento municipal y como consecuencia el agua retrocedió por las rejillas y sumideros y sanitarios de las viviendas rebosando o si la inundación se debió a la situación excepcional de las lluvias torrenciales, circunstancia de fuerza mayor que exime de responsabilidad a la Administración demandada, el tribunal afirma que, "la Administración demandada no ha acreditado que las lluvias torrenciales caídas fuesen imposibles de controlar, ni que concurra la circunstancias de fuerza mayor, siendo a ésta a la que corresponde la carga de acreditar este hecho", declarando, por tanto su responsabilidad patrimonial.

No obstante, aunque le corresponda probar la existencia de la fuerza mayor a la Administración, ello no es óbice para que el particular puede aportar al procedimiento, si lo desea, pruebas de la ausencia de la fuerza mayor, por ejemplo, para acreditar que unas lluvias no pueden ser calificadas de

[8] En el supuesto de que se produzca un fenómeno extraordinario podrá indemnizar el siniestro, si se aprecian el resto de los requisitos legales, el Consorcio de Compensación de Seguros. Al respecto *vid*. Burgos Garrido, B. (2018). "El aseguramiento de las catástrofes naturales en España", en *Riesgos Naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, (Dir.: Estanislao Arana García, Coords.: Jesús Conde Antequera, Jesús Garrido Manrique y Asensio Navarro Ortega, Madrid, Dykinson, pp. 415-457.

extraordinarias o catastróficas. Ello suele realizarse con informes periciales de pluviometría que tienen en cuenta la media aritmética de las precipitaciones máximas anuales por metro cuadrado y las caídas en ese día concreto.
5º) Que la reclamación se efectúe en el plazo de un año. Hemos de aclarar que este requisito no es propiamente un presupuesto de la responsabilidad administrativa sino del ejercicio de la acción para hacerla efectiva.

Para exigir los daños producidos por inundaciones el plazo legalmente establecido para la prescripción del derecho a reclamar es de un año al igual que en otros supuestos de responsabilidad patrimonial, no presentando ninguna peculiaridad en este sentido. (art. 67 LPACAP).

2.2. Concurrencia de responsabilidades en supuestos de inundación

2.2.1. Concurrencia de responsabilidades entre la Administración y el particular

Algunas sentencias se ocupan de casos donde junto a la responsabilidad de la Administración por falta de mantenimiento de las redes de saneamiento y alcantarillado se produce una acción u omisión del particular que contribuye al daño, en estos casos cabe preguntarse hasta qué punto cabe imputar a la Administración la totalidad del daño ocasionado.

Este es el supuesto de la STSJ de Aragón, (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 90/2000, de 4 de febrero, donde se declara la concurrencia de culpas entre Administración y particular de la inundación producida por la insuficiencia de la red de vertido para asumir agua procedente de lluvia no calificable de tromba excepcional y la defectuosa instalación y mantenimiento de la tubería privada de vertido del edificio. Entiende el tribunal en este caso que la culpa del perjudicado sin exonerar de responsabilidad a la Administración "se traduce en la ponderación de la indemnización que la Corporación ha de resarcir a aquél sobre principios de equidad, que, con la modulación subjetiva que conlleva" y cifra esa culpa en un 25% por lo que correrá a cargo del particular la cuarta parte de los daños ocasionados y las tres cuartas partes restantes a la Corporación. Por tanto, la concurrencia de culpas no supone el reparto de los costes de los daños por mitad, sino que la cifra será ponderada atendiendo al grado de culpa en cada caso concreto.

Otro supuesto lo expone la STSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 2751/2012, de 22 octubre, que analiza un caso donde una vivienda sufre una inundación debido a un atasco y retroceso del colector general de saneamiento, responsabilidad del Ayuntamiento, pero al mismo tiempo se da la circunstancia de que el sumidero por el que entró el agua residual en la vivienda se hallaba ubicado a una cota más baja que el nivel del suelo de la calle y que las tapas de los pozos de registro del colector general, hecho que, tal y como reconoce la sentencia, con independencia de si se trata de un defecto constructivo o no, es un factor que incidió en la naturaleza y gravedad del perjuicio. Motivo por el cual entiende que procede reducir el porcentaje de responsabilidad de la Administración en este caso concreto en un 50% de la cantidad reclamada.

Sin embargo, en la STSJ de Extremadura, (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1092/2003, de 14 julio, se estima íntegramente la responsabilidad de la Administración al acreditar la parte actora con una amplia prueba (con un informe pericial elaborado por un ingeniero industrial y otro de un arquitecto técnico) que los daños producidos por la inundación de su local se debieron al embalsamiento de las aguas en la zona causadas por un sobre elevamiento de la calzada, sin salida de las aguas que hace de dique y no permite el paso de las aguas en su curso natural, ya que el Ayuntamiento, al pavimentar la zona, elevó la cota de la calle. Asimismo, la situación anterior se vio agravada porque el Ayuntamiento sustituyó un puente que antes existía, por un imbornal que es insuficiente para soportar el caudal para la recogida de las aguas pluviales, en días de intensas

precipitaciones. Por estos motivos, el tribunal estima la responsabilidad de la Administración dado que "los daños producidos son consecuencia directa de una defectuosa urbanización por parte de la Corporación Local demandada que procedió a asfaltar una calle sin realizar un estudio suficiente de las aguas que discurrían por dicha zona y sin dotarla de un sistema suficiente para la evacuación de las aguas, no siendo imputables los daños a la situación o características constructivas del inmueble" (FJ 3º).

2.2.2. Concurrencia de responsabilidades entre distintas Administraciones

En caso de que se dé un supuesto de corresponsabilidad de distintas Administraciones, la misma tendrá carácter solidario a tenor del art. 33 de la Ley 40/2015, de 1 de octubre, de Régimen Jurídico del Sector Público. El supuesto típico es el caso de desbordamientos de ríos urbanos cuando el mantenimiento de los cauces presenta deficiencias, correspondiendo el mismo a la respectiva Confederación Hidrográfica y, a la par, se da una inadecuación del mantenimiento en las redes de alcantarillado y saneamiento competencias de los Ayuntamientos.

En estos supuestos, tal y como indica MOLINA GIMÉNEZ "el Tribunal habrá de determinar el grado de responsabilidad de cada una de las Administraciones implicadas, y establecer el *quantum* correspondiente en función del análisis resultante. Se trata, lógicamente, de una cuestión a valorar caso por caso."[9]

Precisamente, un supuesto de corresponsabilidad administrativa es analizado por la SAN (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 159/2016, de 3 diciembre. Que se ocupa de dilucidar la responsabilidad en una inundación producida en Écija a causa del desbordamiento del arroyo Argamansilla a su paso por dicha ciudad primero y del río Genil, viéndose afectado el 30% del casco urbano, entre ellas la vivienda del reclamante, causándole daños materiales y morales, cuya indemnización solicita. Por lo que la actora interpone reclamación contra el Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente,[10]el Ayuntamiento de Écija y la Junta de Andalucía.

Para probar la responsabilidad el reclamante acompaña informe pericial de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, en el que se manifiesta que "dichas inundaciones no traen causa directa de las lluvias acaecidas, sino en la falta de limpieza del colector por el que se encauza el arroyo a su paso por la ciudad". En concreto, relata como debido a inundaciones previas a los hechos que se dilucidan ese encauzamiento se encontraba con depósitos y sedimentos que en las zonas más afectadas hacían que se redujese la capacidad del arroyo en un 60-70%, tal y como informó también en fechas anteriores el propio Arquitecto Técnico Municipal de Mantenimiento y, a pesar de que tal y como se advirtió en ese documento era necesario retirar esos depósitos para evitar nuevas inundaciones, los trabajos de limpieza comenzaron 8 meses después sin que hubiesen finalizado todavía cuando se producen las lluvias que causaron el desbordamiento del arroyo que ahora se enjuicia.

Además, añade el informe, "que la estación de bombeo de aguas pluviales que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha ejecutado al final del recorrido del arroyo y que permite desaguarlo no estaba en funcionamiento en las fechas del desbordamiento, lo que contribuyó a agravar la situación. Considera, en definitiva, que el suceso pudo haberse evitado si la sección del colector hubiese estado limpia", e imputa la causación de dichos daños tanto al Ayuntamiento de Écija, a la

[9] MOLINA GIMÉNEZ, G.: *La disciplina territorial del riesgo de inundaciones en el ordenamiento jurídico español*, en Revista Aranzadi de Derecho Ambiental núm.18, 2010, p. 38 en Aranzadi digital, pp. 39 a 72 en la revista impresa.

[10] Puede llamar la atención al lector el hecho de que se demande tanto al Ministerio como a la Junta de Andalucía, ello se debe a que en el caso de autos se había declarado nulo el Real Decreto 1666/2008 sobre traspasos de funciones y servicios de la Administración del Estado a la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de recursos y aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las aguas de la cuenca del Guadalquivir, teniendo encomendada la Junta las competencias en las fechas en que se produjeron los hechos.

Comunidad Autónoma de Andalucía ya la Administración del Estado (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir). El tribunal aprecia positivamente este informe y concluye que se trataba de "una situación previsible con antelación suficiente que hubiera permitido adoptar medidas a la Administración que evitasen los daños causados, no pudiendo, en definitiva, atribuir la inundación a un acontecimiento calificable de fuerza mayor"[11].

Concluyen el tribunal, con aludiendo de las SSTS de 31 de octubre de 2006, y de 26 de abril de 2007, con cita, a su vez, de numerosos precedentes, en el siguiente sentido: "Es evidente, pues, que […] la Administración tiene la obligación de realizar actuaciones o impedir hechos que pueden provocar el desbordamiento y la perniciosa acción de las aguas que discurren por los cauces naturales, con la excepción de los acontecimientos de lluvias torrenciales o a destiempo que son considerados como casos de fuerza mayor excluidos expresamente por la Ley […]. La fuerza mayor, como tantas veces hemos declarado, no sólo exige que obedezca a un acontecimiento que sea imprevisible e inevitable, como el caso fortuito, sino también que tenga su origen en una fuerza irresistible extraña al ámbito de actuación del agente".

Por su parte, la Audiencia Nacional ha señalado de forma reiterada, "que la obligación de los organismos de cuenca de realizar las correspondientes actuaciones tendentes al mantenimiento y conservación de los cauces que constituyen parte del dominio público hidráulico se sustenta en los arts. 23, 40, 42, 92 y 94 del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas, de los que se deduce la obligación de las Administraciones públicas hidráulicas competentes, encargadas de la administración y control del dominio público hidráulico, de mantenerlo en buen estado y de asegurar su adecuada protección con arreglo a lo previsto en el correspondiente plan hidrológico de cuenca, que comprenderá los criterios sobre estudios, actuaciones y obras para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos. Pues bien, el invocado art. 28.4 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, establece que las actuaciones en cauces públicos situados en zonas urbanas corresponderán a las Administraciones competentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo, sin perjuicio de las competencias de la Administración hidráulica sobre el dominio público. La STS de 10 de junio de 2014 establece que la interpretación del art. 28.4 de la Ley del Plan Hidrológico Nacional exige aclarar a que actuaciones se refiere y una lectura del conjunto lleva a pensar que se trata de aquellas actuaciones en cauces públicos que no supongan invasión de las competencias de la Administración hidráulica sobre el dominio público hidráulico. En el caso de autos concurre la peculiaridad de que el encauzamiento del arroyo Argamansilla a su paso por el núcleo urbano de Écija, recoge las aguas provenientes de la cabecera del Argamansilla y funciona también como colector de aguas pluviales, formando parte de la red de saneamiento de pluviales de dicha población."

[11] A mayor abundamiento, ante supuestos de responsabilidad patrimonial de la Administración por daños causados en inundaciones por desbordamientos de ríos la jurisprudencia ha afirmado que debe reconocerse responsabilidad administrativa *"no sólo en los casos en que la inundación o el desbordamiento es originado por una actividad administrativa positiva o por la omisión unida a la creación de una situación previa de riesgo -en una modalidad que podría caracterizarse como equivalente a la comisión por omisión-, sino también en los casos en que se incumple de modo omisivo puro el deber de poner fin o impedir hechos o actos ajenos a su actuación que pueden provocar el desbordamiento y la perniciosa acción de las aguas que discurren por los cauces naturales. Solamente se reconocen como excepciones, en uno y otro supuesto, los acontecimientos de lluvias torrenciales o a destiempo, que son considerados como casos de fuerza mayor excluidos expresamente por la ley. (...) El deber de responder en el supuesto de desbordamiento de un cauce en circunstancias climáticas normales como consecuencia del incumplimiento de la administración de mantenerlo en debidas condiciones o de evitar la actuación de terceros que puedan suponer un obstáculo al curso de las aguas no se manifiesta sólo, como primordialmente se ha discutido en el proceso y entiende la sentencia recurrida, en la elaboración y ejecución de planes, sino también, y de modo quizá menos característico, pero más continuo, directo e inmediato, en la función de policía de aguas que corresponde a la administración". Vid.* las SSTS de 31 de octubre de 2006, y de 26 de abril de 2007.

Finalmente, con invocación del art. 25.2 LBRL, el tribunal estima que, al integrarse en la red de saneamiento de pluviales de dicho municipio, "es evidente que el Ayuntamiento tiene competencias sobre el citado encauzamiento y debe mantenerlo en condiciones adecuadas para permitir que las aguas fluyan o circulen a través del mismo y no rebosen o salgan al exterior debido a los sedimentos existentes" por lo que le es imputable la existencia de responsabilidad patrimonial.

No obstante, junto a la responsabilidad del Ayuntamiento estima también la de la Comunidad Autónoma que ostenta competencias concurrentes sobre el citado medio hídrico, "especialmente en un supuesto como el presente en el que las actuaciones a realizar sobre el encauzamiento pueden calificarse como extraordinarias, consecuencia de la acumulación de residuos o aterramientos producidos por unas inundaciones previas, que requirieron para su limpieza de la realización de unas obras de limpieza de envergadura. Posibilidad de competencias concurrentes sobre el mismo medio hídrico contemplada en el artículo 128.1 del Texto Refundido de la Ley de Aguas." SAN (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 159/2016, de 3 diciembre, FJ 7º.

2.2.3. Responsabilidad patrimonial del Ayuntamiento en casos de gestión indirecta del servicio. Por otra parte, podemos encontrarnos con numerosos supuestos donde la Administración municipal tenga encomendada la gestión del servicio a una concesionaria. Un ejemplo de ello sería el Dictamen Consejo Consultivo de la Comunidad de Madrid núm. 38/2013, de 6 de febrero, en el que una comunidad de propietarios reclama al Ayuntamiento de Madrid por los daños producidos tanto en los elementos comunes del edificio como en representación de diversos propietarios a casusa de unas filtraciones provenientes del alcantarillado municipal.

No obstante, el Ayuntamiento de Madrid, pretende eludir su responsabilidad, argumentando que, en virtud de convenio de encomienda de gestión de los servicios de saneamiento que suscribieron el Ayuntamiento de Madrid, la Comunidad Autónoma de Madrid y el Canal de Isabel II, es la Comunidad de Madrid quien tienen encomendada la gestión para su explotación a través de la entidad de Derecho público Canal de Isabel II, dándose la circunstancia de que en una cláusula de dicho convenio se estipula que le corresponderán a este último los trabajos de explotación y mantenimiento de la red municipal de alcantarillado. Alegando su falta de legitimación pasiva en la reclamación.

A este respecto, el Consejo Consultivo se manifiesta diciendo que "la Administración, como titular de un servicio público responde de su buen funcionamiento y es responsable frente a los ciudadanos de los daños que dicho servicio pueda causar, con independencia de su derecho de repetir contra el contratista, o ejecutante de las actividades que dicho servicio comporta, o con independencia de la figura a través de la cual se preste dicho servicio público. Diversos criterios nos llevan a tal consideración. Así, en primer lugar, nos encontramos ante un supuesto de responsabilidad solidaria." En este sentido, recuerda el Consejo que la consideración de responsabilidad solidaria no obsta la naturaleza del Canal de Isabel II la cual se considera legalmente Administración Institucional de la Comunidad de Madrid.

El Consejo Consultivo de Madrid cita especialmente las STSJ de Madrid de 18 de julio de 2006 y 25 de septiembre de 2008, en la que se manifestaba que: "ni se puede tener en cuenta las alegaciones exculpatorias realizadas por el Canal de Isabel II en base a que la competencia del servicio de distribución y alcantarillado es competencia de las corporaciones locales, cuestión que no es discutida, ni es objeto del presente procedimiento, ni tampoco las alegaciones realizadas por la corporación local ya que el último responsable del servicio es siempre el Ayuntamiento por tratarse de competencias irrenunciables sin perjuicio del modo de prestarse la misma, todo lo cual hace que ambas administraciones deban responder solidariamente de los daños causados".

Por otra parte, argumenta el Consejo Consultivo que "el hecho de que el Canal de Isabel II ejecute el servicio en virtud de una encomienda de gestión no excluye la legitimación pasiva del Ayuntamiento de Madrid, Administración a la que se ha dirigido el perjudicado en solicitud de responsabilidad patrimonial y frente al que debe responder." En relación con lo expuesto, en el dictamen del Consejo Consultivo de Madrid 125/10 se aclara que: "la encomienda de gestión no supone cesión de titularidad de la competencia ni de los elementos sustantivos de su ejercicio, siendo competencia del órgano o entidad encomendante dictar cuantos actos o resoluciones de carácter jurídico den soporte o en los que se integre la concreta actividad material objeto de encomienda"[12], de lo que deriva que la titularidad de la competencia, aun habiéndose producido una encomienda de gestión, sigue siendo municipal. Por tanto, estimamos que el Ayuntamiento no puede eludir su responsabilidad en estos supuestos.

2.3. Responsabilidad exclusiva de la concesionaria municipal del servicio de aguas

A pesar de lo indicado respecto a la obligación de mantenimiento por parte de los Entes Locales puede darse el supuesto de que excepcionalmente se atribuya la responsabilidad de una determinada inundación exclusivamente a la concesionaria municipal. Este es el supuesto de la TSJ de Andalucía, Granada (Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª) núm. 1380/2018, de 12 julio, que atribuye la responsabilidad de una inundación producida en un local de negocio, a la concesionaria estimando que la misma se había producido "por el deficiente funcionamiento de la red de saneamiento, la cual estaba en malas condiciones por el agotamiento de su vida útil, pero dado que la concesionaria a pesar de haber recibido quejas de vecinos durante meses antes de producirse el siniestro, no informó al Ayuntamiento de dicha incidencia en el servicio como estaba obligado a ello, apreció que la responsabilidad por el funcionamiento anormal del servicio público correspondía exclusivamente a la concesionaria". Todo ello en base a la Ley de Contratos del Sector Público que establece que "*Será obligación del contratista indemnizar todos los daños y perjuicios que se causen a terceros como consecuencia de las operaciones que requiera la ejecución del contrato*", aunque en el supuesto se aplica por la fecha de los hechos, el art.198.1 de la Ley 30/2007, de 30 de octubre, de CSP hemos de recordar que la actual Ley 9/2017, de 8 de noviembre de CSP tiene el mismo tenor literal en su art. 196.

3. CONCLUSIONES

Las redes de saneamiento y alcantarillado son infraestructuras urbanas poco visibles, pero de una gran trascendencia para la población, dado que, tal y como hemos visto, su falta de mantenimiento o inadecuación para asumir las aguas pluviales y residuales, puede derivar en graves inundaciones que provocan importantes daños materiales, personales y morales. Ello originará, consecuentemente, un expediente de responsabilidad administrativa municipal (que puede ser declarada también en concurrencia con el particular, con otras Administraciones, o incluso con la concesionaria) por inadecuado funcionamiento o funcionamiento anormal de este servicio público.

No obstante, más allá de su obligación indemnizatoria en estos supuestos (siempre y cuando se cumplan los requisitos expuestos), consideramos que los poderes públicos no pueden ampararse con carácter general en una supuesta *inevitabilidad de la inundación*. Efectivamente, habrá supuestos de

[12] En similares términos el Dictamen del Consejo Consultivo de Madrid 193/11, en el que el Ayuntamiento de Madrid alegaba su falta de legitimación pasiva en un supuesto donde los daños inicialmente podrían haber sido causados por una tapa de registro del Canal de Isabel II. En relación con esto se exponía que: "el hecho de que la titularidad de las tapas de registro no corresponda al Ayuntamiento no modifica la responsabilidad patrimonial de éste por incumplimiento del deber de vigilancia y mantenimiento de las vías en condiciones de seguridad, de acuerdo con la jurisprudencia del Tribunal Supremo (Sentencias de 22 de septiembre de 2003, recurso 1412/1999, y 22 de diciembre de 1994, recurso 2463/1991). Ello sin perjuicio de que la responsabilidad última podría recaer en el titular de la tapa, en este caso Canal de Isabel II, contra quien podría el Ayuntamiento ejercitar el derecho de repetición".

fuerza mayor en los que habiéndose adoptado todas las cautelas por parte de la Administración, aun así se produzcan los daños, claro está que en estos supuestos la Administración no será responsable. Por tanto, en temas de responsabilidad patrimonial a consecuencia de inundaciones urbanas, como conclusión hemos de extraer que habrán de valorarse individualizadamente las circunstancias de producción en cada caso concreto.

Sin embargo, tal y como ha quedado probado con la exposición de la casuística expuesta, no todas las inundaciones son inevitables y así lo ha entendido la jurisprudencia. Se requiere, por tanto, una asunción de responsabilidad, en el sentido de proactividad en la adecuación de este servicio, por parte de los Entes Locales que, en ninguna medida, pueden descuidar sus labores de mantenimiento y adecuación del saneamiento y alcantarillado municipales tal y como exigen los mandatos contenidos en la LBRL, no pudiendo dejar al albur de la naturaleza la causación de estos fenómenos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de los Proyectos I+D del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia: DER2017-87789-R “Los servicios urbanos del agua en España y Europa: Retorno a la gestión directa o colaboración público-privada, pero con un efectivo gobierno y control público del servicio” e I+D+i del programa FEDER Andalucía: B-SEJ-444-UGR1 “El ciclo urbano del agua en situaciones de sequía y escasez: medidas preventivas y reactivas.” (Investigadores principales: E. Arana García y J. Conde Antequera).

REFERENCIAS

- Burgos Garrido, B. (2018). El aseguramiento de las catástrofes naturales en España. En: Estanislao Arana García (Ed.), Jesús Conde Antequera, Jesús Garrido Manrique y Asensio Navarro Ortega (Coord.), *Riesgos Naturales y Derecho: una perspectiva interdisciplinar*, 415-457, Dykinson, Madrid.
- Conde Antequera, J. (2015). La responsabilidad de la Administración por daños derivados de fenómenos naturales: especial referencia al riesgo de inundación. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 45-46, 67-100.
- García Gándara, C. (2013). *Evolución temporal de la frecuencia, magnitud y daños por inundaciones, e identificación de los factores determinantes*. Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria. https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/3181
- Melgarejo Moreno, J. (2001). El visionario proyecto contra las avenidas de R. García y L. Gaztelu. Más de un siglo de vigencia. En: J. Melgarejo Moreno (Ed.), *Proyecto de obras de defensa contra las inundaciones en el valle del Segura,* 561-589. Ministerio de Medio Ambiente, Confederación hidrográfica del Segura, Murcia.

DE LA ROGATIVA POR EL AGUA A LA INTERVENCIÓN PREVENTIVA POR INUNDACIÓN. LA HUELLA DEL DERECHO EN LA FACHADA MEDITERRÁNEA PENINSULAR (I)

Mª Magdalena Martínez Almira
Departamento de Ciencias Histórico-Jurídicas, Universidad de Alicante, España
mm.martinez@ua.es

RESUMEN

Desde tiempo inmemorial el hombre ha mirado a la naturaleza con reverencia y respeto. Agradecer el agua como bien necesario para la supervivencia y rogar por ella en momentos de carestía se conjuga con otras acciones emprendidas para su preservación y buen uso. Entre las muchas acciones encaminadas a controlar la furia del agua está la preservación de los cursos naturales y de las infraestructuras de factura humana en condiciones óptimas para no entorpecer el fluir del líquido elemento. Con el paso de los siglos ese compromiso entre los usuarios, regantes o consumidores en cualquier otro ámbito se ha desnaturalizado, no obstante, el derecho vigente. La huella del derecho en la prevención de daños por siniestros causados por fuerza mayor o descuido humano tiene un peso específico en nuestra legislación de la fachada levantina mediterránea, con paralelismos en toda la cuenca del Mar Mediterráneo que nos circunda. La finalidad de este trabajo es recuperar la memoria histórico-jurídica que permite comprender la deriva del derecho en esta materia, con el fin de ofrecer un marco de referencia con fines utilitaristas de futuro.

> *El fomento de la agricultura del país (...) en la historia particular de cada distrito, no solo descubriría ventajas considerables en el mejor modo y forma de dirigirse, con respecto a los riegos, sí que adelantaría en los conocimientos relativos á varios magníficos acueductos y otros preciosos monumentos destinados á dicho ramo de la riqueza pública que poseemos sin hacer caso de ellos, y á los que debe su alimento y bienes una población inmensa (.) Esta gran obra sería mirada en España como un modelo para dirigirse en todos los asuntos concernientes á regadíos apetecida y aun envidiada de las naciones extranjeras* (Mingot, 1625).

1. INTRODUCCIÓN

Hace ya unos años tuve ocasión de expresar en el trabajo titulado *Derecho de uso y aprovechamiento sobre las aguas estancas. Concepto, objeto y casuística en el Derecho andalusí* la importancia que para un investigador sobre esta materia tenía el documento titulado *Addressing the Challenges of water scarcity and droughts in the European Union*, comunicación del Parlamento y Comisión europea publicado en 2007. Han pasado 13 años desde ese texto, y el reto sigue siendo el mismo respecto a la necesidad de gestionar, adecuadamente, el agua, procurar su ahorro y distribución acorde con las necesidades de los usuarios. Pero la hemeroteca sigue ofreciendo ejemplos de que la combinación de ahorro y gestión de las inundaciones no se consigue fácilmente, y la distribución equitativa, y lo que la Unión Europea en 2004 propuso, "actuación ex ante", no es objetivo cumplido. Entonces como ahora la necesidad de previsión sigue siendo un desideratum.

El agua aun teniendo el carácter de bien natural desde tiempo inmemorial ha sido causa de iniciativas por parte del hombre cuando su carencia o escasez motivaba privación y sufrimiento para los seres vivos; también cuando su exceso propiciaba estragos, bien en forma de pedrisco, inundaciones, avenidas o riadas; conceptos que llevan a pensar en situaciones o experiencias negativas para quienes las sufren o experimentan, tanto en sus personas como en sus bienes.

Respecto a los episodios de escasez o carencia, la mayor de las veces durante el periodo estival y en casos extremos prolongados más allá de esa estación con carácter de sequía anual o permanente, las rogativas eran el modo más frecuente de relación entre los "demandantes" del agua, bien fueran regantes o simplemente usuarios en el ámbito urbano o rural, y la divinidad, o fuerzas de la naturaleza. En una sociedad en la que el laicismo no tenía cabida nada extraña a solicitar la clemencia divina, asumiendo parte de responsabilidad en la privación del agua por parte del dios de cada comunidad; en nuestra cultura peninsular, uno solo por más que se le dieran nombres distintos. Tomando en consideración que la actividad económica principal era la agricultura, cristianos y musulmanes, los principales hacedores del milagro de la producción hortofrutícola recurrían a ceremonias religiosas, que parecían dar sus frutos[1]; y de ello dan pruebas muchos conjuros[2] y letanías documentadas en las distintas culturas de nuestro territorio[3].

Todo indica que era mucho más preocupante la carencia del agua que los desastres que pudieran provocar inundaciones y pedrisco; y de la normativa sobre el uso y distribución del agua se deduce que para "solicitar" el agua del cielo había que pronunciar letanías, jaculatorias, o "rogarías" al Altísimo, conforme a ceremonial detallado y preciso a modo de instrucciones para conseguir la máxima eficacia, y escuchar los sermones de la autoridad religiosa concienciando a los escuchantes de que no solo debían "afanarse" en su mayor espiritualidad sino también en enmendar o corregir actuaciones que todo parecía *no agradaban a los ojos de Dios*[4]. También los *Capítulos e Ordinacions* del común y acequia de Favara reconocían en Dios la "potestad" o voluntad verse privados del agua[5]. Este carácter inculpatorio conlleva a interpretar la carencia de agua, la sequía como un castigo divino.

Y sin embargo riadas, avenidas e inundaciones, aun "viniendo también del cielo" no tenían tanta impronta en el ceremonial religioso, y sí en las normas o derecho aplicado y preservado en el tiempo como patrimonio jurídico en materia de aguas. Si bien, y volviendo al caso de la cequia de Favara, se

[1] Sobre rogatorias en el ámbito agrícola y sus efectos véase CREMADES PRIETO, C.V., *Rogativas "pro pluvia" y "pro serenitate" en la cuenca del Segura durante la PEH: información suministrada por el Archivo Diocesano de Orihuela*, en *Riesgo, desastre y miedo en la península Ibérica y México durante la Edad Moderna*, coordinado por Armando Alberola Romá, 2017, págs. 47-69; interesante también por el análisis de los efectos a nivel humano es la tesis de BUENO VERGARA, E., *Clima, desastre y religiosidad en los dietaristas valencianos de los siglos XVI y XVII*, Enrique Perdiguero Gil (codir. tes.), Armando Alberola-Romá (codir. tes.). Universitat d'Alacant - Universidad de Alicante (2014).

[2] *Manuscritos árabes y aljamiados de la Biblioteca de la Junta. Noticias y extractos de los alumnos de la sección árabe bajo la dirección de J. Ribera y M. Asin*, Madrid, 1912, Códice de miscelánea, doc. IV, "El adoa de la apedreada y ex xu alfadila muy grande y marabilloxa", p. 14; y María del Pilar Martínez Olmo, P., *Colección de manuscritos árabes y aljamiados de la Biblioteca del Instituto de Filología del CSIC [Recurso electrónico]: los manuscritos de la Junta*, Instituto de Filología (Madrid), 1998. Por el carácter de esta contribución a la obra colectiva solo citamos los documentos de la edición de 1912, como referencia para el lector interesado en esta temática.

[3] *Manuscritos árabes y aljamiados,* "Letanía para pedir agua" doc. XXIII, rogatoria para pedir agua en aljamiado para cuando había menester, del siglo XVI; op.cit., p. 105.

[4] En 1597 se escribe un libro (alquiteb) "del rogar por el agua", en *Manuscritos árabes y aljamiados,* "El alquiteb del rogar por el agua" doc. X, pp. 122/3. Y también de ese mismo siglo se encuentra una *Rogaría del agua para cuando habrá necesidad de rogar por agua* en "Legajo miscelánea" doc. XLI, p. 152.

[5] Capitols y ordenacions fets y estatuhides pera el bon govern y conservación de la comuna y cequia de Favara per los elects y sindich de ella. Ab a acte rebut per Jusep Orient y Latzer, sindich, notari de dita comuna, en 18 de Mars de 1701, ab sa decretació al peu continuada al peu continuad, "Capitols respectans al ofici de sindic", p. 196.Es este el caso que obligaba a "tandechar les ccequies" lo. que indica por otro lado que el uso y acceso al agua no se asignaba por tandas solo en caso de necesidad y reducción del volumen. (En adelante Capitols e Ordinacions de Favara)

encomendaba a Dios no permitiera o no le "placiera" se produjeran avenidas del río, que según dice el texto acaecían *per alguns infortuins de temps*[6]. Aunque los males derivados de la incidencia abrupta y descontrolada del agua, según el derecho aplicado por las distintas comunidades, en cualquier cuenca hidrológica y constante el tiempo, podían ser previstos tanto por los veedores y responsables de su curso y distribución como por los usuarios.

También en la huerta oriolana regada por el río Segura se contienen semejantes disposiciones por Alfonso X en 1271 al ordenar a todos *los dueños de heredades* contribuyeran en la reparación de acequias, azudes y pechos de la villa, para el buen discurrir del agua, y evitar así siniestros y males, como hacían desde antaño los musulmanes al frente de aquellas tierras. Y así fue en el territorio peninsular hasta comienzos del siglo XVII, en una segunda etapa finisecular y hasta el XIX para "los herederos" del antiguo sistema de riego, del legado arquitectónico, jurídico y sapiencial. Muestra de ello son las Ordenanzas aprobadas para todo el ámbito de Cataluña y el Reino de Valencia, citando por caso y justificado por la actualidad que esos mismos desastres han tenido y tienen en tiempos recientes; en esa normativa "actualizada" se constata el valor de lo legado exigiendo a los "herederos" asuman las mismas responsabilidades de sus ancestros. Las Ordenanzas que define la Orden de 26 de julio de 1870 *un Código á que la ley da fuerza de tal mientras no se solicite su reforma y las indemnizaciones pecuniarias que se impongan no excedan el límite que marca el art. 625 del Código Penal*[7].

Respecto a la importancia que esta materia tiene, decir que si relevante era la escasez para continuar la vida de hombres, plantas y animales también lo era el exceso del líquido elemento sobre infraestructuras, bienes y explotaciones, y por supuesto cuando se llevaba vidas humanas. La atención prestada desde tiempo inmemorial a las zonas inundadas e inundables se focaliza en dos aspectos. El primero por el efecto que el agua pueda causar sobre un terreno en producción o potencialmente considerado para tal fin. El segundo como terreno susceptible de generar recursos para el Estado a partir del derecho que sobre el mismo se ejerce. Siniestralidad y rentabilidad son dos nociones antagónicas pero que han llamado la atención de los responsables administrativos y de los gobernantes a la hora de adoptar medidas que bien eviten o prevengan la primera bien reconozcan un derecho de propiedad en favor de los usuarios o beneficiarios de esos terrenos.

2. INUNDACIONES, DETECCIÓN Y SENSIBILIZACIÓN DEL "COMÚN" PARA LA TOMA DE DECISIONES RESPONSABLES

La actualidad de esta problemática y su contemporaneidad es consecuencia de un modelo de gestión y distribución del agua mimetizado con el paisaje, con la orografía y especialmente con la hidrografía. Se colige de esto que, aun rigiéndose el modelo productivo por otras máximas o principios, fundamentados en el modelo económico de agricultura intensiva, imperante en las últimas décadas en la fachada levantina -que hace difícil la convivencia con el sistema tradicional de producción extensiva, no obstante, la pervivencia y mantenimiento de los recursos hidráulicos de origen milenario-, el peso específico del sistema heredado es innegable, como sistema legado y patrimonio valioso. Las razones de ese intento de supervivencia, de convivencia pacífica entre propuestas innovadoras, modernizadoras y sostenibles, estriban en el origen milenario, ancestral y válido que se transmite fielmente entre generaciones mediante la fórmula tierra y derecho al agua sin solución de continuidad, y porque para muchos, aun a pesar de las cifras comparadas[8], el sistema sigue

[6] Capitols e Ordinacions de Favara, "Capitols respectans al ofici de guarda", p. 216.

[7] Orden resolviendo que lo dispuesto en el art. 13 de la Constitución no obste para que los Tribunales y Jurados de aguas, legalmente constituidos, sigan corrigiendo las infracciones que se cometan de las Ordenanzas por que se rigen las respectivas comunidades. Gaceta de Madrid: núm. 223, de 11/08/1870, página 2 Ministerio de Fomento, *(Referencia BOE-A-1870-6157)*.

[8] Remítase el lector a los informes del Ministerio, en concreto *Informe Anual de Indicadores: Agricultura, Pesca,*

funcionando. Y funciona porque todavía se da credibilidad a las personas responsables de su mantenimiento, distribución y celo en un reparto proporcional y justo. Pero el sistema, tal y conforme se mantiene y gestiona en la actualidad es cuestionado en momentos de riesgo ante inundaciones o siniestros por avenidas de aguas, cuando además estaba prohibido hacer paradas para el riego[9].

En esta línea llama la atención la hemeroteca. Así, por ejemplo, en julio de 2018 –época estival y de sequía tradicionalmente en nuestras cuencas levantinas- la noticia estaba en la instancia por parte de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) a los regantes para realizar las obras pertinentes que evitaran la llegada de residuos sólidos flotantes al álveo o cauce del río Segura, y por ende la obstrucción de zonas de desagüe e incluso de riego tradicional. En este asunto llama la atención cuatro elementos o componentes en el argumentario: la alerta de la CHS sobre un mal inminente y previsible; la incidencia de residuos sobre *el mal uso o deterioro del dominio público hidráulico*; el traslado de responsabilidad a los regantes del estado de conservación de ese dominio; y los efectos que se derivaran de la presencia de bardomeras con cañas y residuos flotantes. Y todo ello bajo medidas coercitivas[10]. Mientras por un lado se exigía esa intervención a los regantes sobre las infraestructuras de su competencia y los residuos generados en el desarrollo de la actividad agrícola –también sobre los que ellos no eran responsables ni habían generado-, pasados dos años, y con motivo de las inundaciones con motivo de la gota fría del mes de septiembre de 2019, la institución de mayor competencia en la gestión y administración de los valencianos a nivel político conseguía un acuerdo para exigir a la CHS una rendición de cuentas respecto al plan de actuación para la prevención de riesgos de inundaciones, tanto a niel territorial, urbanístico, agrario e hídrico; diversas imágenes de un paisaje que es el que caracteriza a todo el Levante peninsular: ríos sometidos a stress hídrico que desembocan en el Mediterráneo y que se ven amenazados, ahora ya por falta de responsabilidad en su cuidado, a obstrucciones y retenciones que dan lugar a que el agua busque, en momentos de furia, salidas naturales tanto de acequias como de manantiales discontinuos[11]. Y estas pasan por áreas urbanizadas o cultivadas con esmero por los "herederos" de aquellos riegos tradicionales, junto a otros innovadores que también han "invadido" el territorio. En esta segunda noticia conviene también destacar los siguientes elementos: el intento de exoneración de responsabilidad del máximo órgano que debe velar por la distribución equitativa y mantenimiento en condiciones de los "recursos hidrológicos" ante el organismo que representa a la sociedad civil, en este caso valenciana y que en última instancia vela por los intereses del pueblo[12]; la concienciación por parte de la clase política de que el problema es de todos y precisa respuesta para todos; la necesidad de rendición de cuentas por las partes que se ven afectadas en uno u otro momento; la conveniencia de prever y adelantarse a los sucesos con medidas paliativas[13]. Noticias hay muchas en esta misma línea, pero al menos estas dos aportan, de forma secuencial, los elementos con los que construir la urdimbre de una problemática que tiene solución y que desde la disciplina histórico-jurídica ofrece datos y normas para la reflexión y crítica constructiva.

Alimentación y Medio Ambiente, 2017 [Disponible en: https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AAYPP%2Finforme_anual_agric_pesca_ali_mm_2017.pdf]; y entre los diversos planes de modernización véanse los Informes de viabilidad de la modernización, según lo contemplado en la Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.

[9] Ordenanzas generales de la azud de Alfeytamy, 1; Cfr. Memoria sobre los riegos de la huerta de Orihuela, p. 130. Siendo preceptivo dejar el cauce limpio, a costa del contraventor, entre el 15 de septiembre y el 15 de mayo desde tiempo inmemorial.

[10] "Los regantes "pagan el pato" del estado del Segura" por Eduardo Gea-Rojales, *Diario El Mundo*. Domingo 8 de julio de 2018, p. 23.

[11] Como así describía la Ley de Aguas de 1876 en relación al mantenimiento de barrancos, ramblas y zonas de avenidas; vid. art. 179.

[12] Les Corts valencianes o Les Corts, véase *Estatuto de Autonomía de la Comunitat Valenciana,* art. 21.1.

[13] "El PSPV cede y las Cortes exigirán otra vez que el presidente del Segura aclare la gestión de la gota fría", por Beatriz Rico, *Diario Información*. Martes 25 de febrero de 2020, p. 27.

Sin lugar a dudas el conocimiento de la norma no eximía antaño de su cumplimiento, y de ahí la toma de medidas por parte del legislador para que ese conocimiento no se pudiera esgrimir en sede judicial como causa de exoneración de responsabilidades.

Varios son los datos con los que se cuenta para justificar esta afirmación. Por un lado, el reconocimiento expreso en la redacción de la normativa que regulaba el uso y distribución del agua de forma equitativa, y conculcaba el mantenimiento de las infraestructuras milenarias y modalidades de gestión. Por otro lado, la canalización de las noticias y obligaciones en materia de aguas por las vías al uso, en lugares públicos y en tiempo de máxima afluencia.

Respecto al primer dato, abundante es la normativa vigente en el tiempo, por más que la actual Ley de Aguas deba citarse como marco general de referencia[14]. En efecto Ordenanzas, aplicadas desde tiempo inmemorial en las cuencas de los ríos de la fachada peninsular, mantienen vivo un sistema de riego, infraestructuras y lo más importante en el caso que nos ocupa: modos, trabajos, y formas legales de exigencia de responsabilidades en el cuidado del curso del agua, para su fluir continuo sin "entorpecer" y sin "entorpecimientos". Cítese la exposición de motivos de las Ordenanzas de la acequia de Mestalla, aprobadas por el real y supremo consejo de Castilla en 9 de julio de 1771, en las que se dice:

> *Para que se formasen ordenanzas para el gobierno de las aguas de la enunciada acequia, en atención á que por lo diminuto, antiguo, y falta de claridad y orden en los capítulos antiguos con el largo tiempo de más de ciento y veintiocho años, sucedía gobernarse la referida acequia más por costumbres y estilos, que por lo antiguamente establecido.*

Lo mismo acaecía en la acequia de Rascaña cuando en 1778 se dio traslado de las Ordenanzas aprobadas por el mismo Consejo en 1761 ante el hecho de que las *antiguas ordenanzas no servían ya, y que se debían mejorar, añadir y reformar otros, para el buen régimen y administración de la nominada comuna y acequia*[15]. Por lo tanto, ya desde los tiempos en que el territorio estaba bajo soberanía musulmana, durante el periodo de la Reconquista, reinado de Jaime I y sucesores, y hasta el año de 1606, antesala del vertiginoso cambio en la titularidad con motivo de las medidas para expulsar a los moriscos, hubo un derecho "establecido" antiguo y válido. Derecho que pervive hasta que se producen cambios en la titularidad y tenencia de la tierra, y que se cuestiona en sede judicial ante los innumerables pleitos por cuestiones de posesión. Se trata de un derecho que se transmite, por lo general, de forma oral y que precisa ser más garantista ante los pleitos que se sustancias en distintas instancias.

Este conjunto de normas, que se ponen en relación con otros documentos de aplicación del derecho sobre el modo de reclamar derechos ante la inobservancia del derecho al agua desde tiempo andalusí, regula aspectos interesantes que orientan al regante y al usuario en sus actuaciones cuando personas expertas son capaces de detectar una amenaza, un problema o un siniestro acuciante. Nada hay mejor para asumir actuaciones responsables que saber dónde hay un problema, a qué causas obedece y qué circunstancias lo provocan. En materia de aguas, en relación con *avenidas de los ríos, desprendimientos o solsidas (solsides),* riadas[16]*, remenses o banchs de fanch y cualquiera accidente*

[14] Especialmente el articulado sobre lo que se define como "tradicional", y que se refiere a organizaciones bajo régimen consignado en ordenanzas "debidamente aprobadas" (art. 85). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, BOE núm. 176, de 24/07/2001.

[15] Ordenanzas de la acequia de Rascaña, op.cit., pp. 261-298.; vid. p. 262.

[16] Con especial mención a las que definen las Ordenanzas de Rovella, al regular el oficio de guarda de la acequia. Ord. 27, sobre cuidar el azut, caseta, almenara y porto, y la obligación de que tuviera cerrada la acequia y bajo el torno cuando hubiera "rihuada", o bien cuando "se esperarán" lo que de nuevo lleva a colegir la necesidad de tener unos conocimientos previos o rudimentarios ¿? Sobre previsión meteorológica; vid. p. 316.

(según las fuentes consultadas[17]) era sabido que se podían producir en momentos concretos del calendario; determinando no solo la obligación de estar al tanto de estas sino de comunicarlo a la junta de electos competente en un periodo no superior a tres días, bajo pena pecuniaria.

Pero una vez detectado el problema, o previsto en su acaecer, era preceptivo comunicar noticia de ello; la sensibilización sobre un acuciante problema comenzaba ya desde el momento en que se compartía el temor ante la amenaza de siniestro. Los medios de divulgación y difusión de la noticia es evidente que han cambiado en el tiempo, pero el pregón público cumplía esa misión de concienciar a la población, y de ahí que se hiciera en sede de mayor confluencia (es el caso de la Seu en Valencia para todos los sucesos y demandas que interpusieran los usuarios). Pasado el tiempo se constata que la comunicación en red y por los medios ejerce esa misma función[18] se ha pasado a la inmediata comunicación por la red. De ahí que el vaticinio de la previsión meteorológica cuente con una herramienta de un valor incuestionable, como así evidencian los comunicados de los tipos de alerta que se dan a conocer al usuario.

El pregón tenía por finalidad indicar el momento en el que cada usuario, cada regante, debía proceder al trabajo de limpieza de la parte que le afectaba, la monda o desbroce, también llamada "escura" entre los valencianos[19]; la forma de tal exigencia escrita era un "mandato" –es el caso del deán de Cartagena García Martínez que en 1272 "de parte del rey" trasladaba mandato para "limpiar y adobar azarbes y todas las acequias para que las aguas vengan sin embargo ninguno, así como venían en tiempo de moros"[20]– que compelía a seguir instrucciones en cuanto a tiempo y forma, con designación de término y la prevención de que "el común" pudiera cortar las cañas o la broza "dentro de los nueve pasos de su cajero" sin impedimento del "frontalero" y con consecuencias también para el síndico que anunciaba tales obligaciones; en efecto, cuando los regantes no atendían a la conminatoria era a él a quien competía hacerlo, cargando posteriormente el coste a los regantes, y su inacción en este sentido suponía pena de diez libras[21].

Una modalidad que en el ámbito de la cuenca baja del río Segura los regantes asumen ha quedado en desuso puesto que la modernización ha llevado al entubamiento de muchas de esas infraestructuras antaño al aire, y respecto a las que aún se mantienen de ese modo –favoreciendo con ello un ecosistema natural con innumerables beneficios para la flora y fauna– es la vía oral la que se utiliza para avisar de estorbos que deben ser retirados; al no haber una vigilancia sobre su ejecución de autoridad competente, son muchas las ocasiones en las que quedan sin ser atendidas esas necesidades de limpieza para evitar males en épocas de avenida[22].

[17] Muchas son las denominaciones que convergen en un mismo sentido: daños importantes por aguas bravas o descontroladas en su curso y fluir natural, por causas meteorológicas o bien por mala praxis. Véase Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla", op.cit., capítulo XXV, p. 118. Capitols y Ordinacions de Favara, Capitols respectant al cequier, Sobre "escures" y "conreo" de la acequia, vid. p. 204.

[18] Servicio Meteorológico Nacional [Disponible: https://www.smn.gob.ar/], y en el caso de la Provincia de Córdoba destaca el Sistema de Gestión de Amenazas (SGA), portal se presenta la información generada por los radares del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SiNaRaMe) dependiente de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda de la Nación, aunque INA-CIRSA no tiene responsabilidad alguna sobre los datos que ofrece [Disponible en: https://sgainacirsa.ddns.net/cirsa/]

[19] Ordenanzas para el buen gobierno y justa distribución de las aguas de la acequia de Tormos aprobadas por Real Órden de 10 de junio de 1843, Capítulo XXII, p. 83; según la norma "en los sitios acostumbrados". Capitols e ordinaciones de Favara, Capitols ofici del sindich, p. 195.

[20] Memorias sobre los riegos de la Huerta de Orihuela, op.cit., pp. 37/8.

[21] Ordenanzas de la acequia de Mislata", op.cit., Ord. XLVII, p. 60. Sobre el contenido del pregón vid. Ord. XLIX, p. 61.

[22] Sobre esta situación testimonio oral GIL, M. Entrevista personal. 15 junio de 2020; y al Juez de aguas en 2017 HUERTAS, T. Entrevista personal. 20 de mayo 2016.



Figura 1. Anuncio pregón en Árchez limpieza del cauce rio Turvilla, Sierra de Bentomiz. Fuente: la autora del texto.

3. LA RESPONSABILIDADES DE LOS USUARIOS ANTE EL SINIESTRO Y LOS DAÑOS POR "FUERZA MAYOR" ANTE LAS INUNDACIONES BAJO SOBERANÍA ANDALUSÍ

Ya en tiempo de los andalusíes la siniestralidad por causa de inundaciones de terreno fue objeto de atención por los juristas y alfaquíes, regulando el derecho de un individuo a reclamar por los daños sufridos, tanto en el ámbito urbano como en el rural, ante el fenómeno del anegamiento. De Ibn al-ʻAṭṭār[23] describe el modelo de formulario o escritura que había que redactar cuando se hubieran producido daños en un terreno bien en propiedad, en concesión o arrendamiento; de manera que no importaba el título que se ostentara sobre la tierra para, dándose los requisitos legales, poder reclamar por los daños sufridos y el lucro cesante. No obstante, el supuesto hace expresa mención a la tierra de las "propiedades" anegadas por el agua de lluvia, para lo cual los testigos no solo debían constatar *in situ* el estancamiento del agua, sino también el volumen de agua que había entrado por causa de "inundación" y a la imposibilidad de poner la tierra en producción respecto a unos productos determinados y un tiempo preciso para la siembra, una vez retirada el agua y secado el terreno; pero también una previsión meteorológica, puesto que la estimación del daño exigía se pronunciaran sobre:

- La imposibilidad de siembra aún retirada el agua (expertos en materia de calidad del terreno y necesidades de los productos sembrados).
- La viabilidad o no del secado del terreno (evaluando los medios e infraestructuras para que así fuera).

[23] Pedro CHALMETA y Marina MARUGÁN, *Formulario notarial y judicial andalusí. Ibn al-ʻAṭṭār (m.399-1009),* Madrid: Fundación matritense del notariado, Madrid, 2000, mod. 152 "Escritura de siniestro por inundación /*istiġdār* de terreno", pp. 606-608. El termino, de la raíz *ġ-d-r* significa "llenarse de charcas o pantanos", CORRIENTE, F., *Diccionario Árabe-Español,* Madrid: instituto Hispano Árabe de Cultura, 1977, p. 549.

- La previsión de buen tiempo, es decir de que no hubiera lluvias en favor del terreno; de hecho, en el texto se alude al saber de los expertos (*por lo que saben*), lo que denota la habilidad para predecir a corto plazo la mejora del tiempo o la finalización de las lluvias; y es este el caso del calendario de Córdoba y la previsión en base a datos ya comprobados y al estudio del carácter cíclico de la climatología en todo el Sharq al-Andalus.
- La seguridad que tenían en la estimación aproximada de los beneficios que produciría una determinada cosecha en esas circunstancias.

Por ello merece atención el espacio de la cuenca mediterránea sobre el que durante siglos se aplicaron medidas bien para prevenir la siniestralidad causada por el agua en zonas de regadío bien para identificar áreas inundables por la orografía del terreno, su proximidad a zonas marítimas y de desembocadura, pero obligadas a tributar (*ḫarāǧ*[24]). Es por ello que en el Levante peninsular se aplicaran análogos criterios respecto a las zonas regadas por los ríos de esta fachada, pudiendo distinguir en ese espacio la alternancia de cuencas hidrológicas de caudal irregular, como el río Segura[25] en Guardamar; las avenidas del río Segura propiciaron que una parte del espacio circundante estuviera sumergido bajo las aguas en gran parte del año, teniendo graves problemas para su avenamiento. Un espacio que las fuentes históricas andalusíes denominan Al-Mudawwar o Almodóvar[26] y se prolongaba hasta las salinas de Torrevieja; un terreno administrado por la Universidad de Almoradí y objeto de intervención humana con el fin de preservar el territorio segregado[27]. Carácter similar a estos terrenos son las zonas inundables o inundadas del área vinculada al río Júcar, en la Albufera en Valencia, la zona de Cullera o la Antigua Albufera de Elche entre otras muchas zonas húmedas de la Comunidad valenciana objeto de regulación normativa desde tiempo inmemorial.[28]El aspecto del paisaje referido exigió desde antiguo la asunción de responsabilidades y de exigencia de reparación de daños por los efectos que el agua pudiera tener sobre bienes y personas; la continuidad de estas obligaciones del "común" son evidentes en el marco jurídico al que nos refiramos.

En este espacio, y por analogía respecto al modelo jurídico imperativo en todo el territorio bajo soberanía andalusí, destacar los elementos que propiciaban perjuicios ocasionados por "fuerza mayor". Ibn al-'Aṭṭār hace remisión a la jurisprudencia e identifica en igual plano a la sequía (*qaḥṭ*) y a la inundación (*istiġdār*) en época de cultivo; inundación que se considera lesiva por el hecho de impedir las labores de arado y siembra de la tierra. Y dice el autor, en base a la jurisprudencia, al tratar el tema del depósito (*wadī'a*)[29], que en el caso de plagas de langostas, de pájaros, incendio y frio –sea cual fuera el grado– en estos casos, el siniestro o *desgracia*[30]*,* o *pérdida accidental* "es imputada a su dueño". Llama la atención que los términos "siniestro, desgracia y pérdida accidental"

[24] Por tratarse de tierras bajo soberanía islámica, no obstante, fueron trabajadas y explotadas por personas no musulmanas (*ḏimmies)*, sobre este término vid. Maíllo Salgado, F., *Diccionario de Derecho islámico,* Gijón: ediciones Trea S.L. pp. 118/9.

[25] Según Idrīsī a los pies de la Sierra de Segura se encuentra el nacimiento del río que discurre por Córdoba y el río que discurre por Murcia y su vega; se trata del *Nahr Mursiya* o *Najr Abyaÿ* o río blanco; Idrīsī, *Description*, op.cit., p. 196. Al-IDRĪSĪ, *Los caminos de al-Andalus en el siglo XII según "Uns al-Muhaŷ wa-rawḍ al-furaŷ" (Solaz de coraciones y prados de contemplación)*, prólogo de Maria J. Viguera; estudio, edición, traducción y anotaciones por Jassim Abid Mizal, Madrid: CSIC, 1989, vid. p. 84.

[26] Guinot Rodríguez, E., *Cartes de població medievals valencianes*, Valencia: Servei de Publicacions de la Prèsidencia, 1991, doc. 148, p. 325 y doc. 247, p. 467, respectivamente.

[27] Muñoz Hernández, R., y Canales Martínez, G., *Las segregaciones municipales del Bajo Segura. Los procesos de Almoradí, Algorfa y Los Montesinos* Murcia: Ayuntamiento de los Montesinos, 2000, p. 86.

[28] Véase la memoria "*Lagunas"* núm. 2, VI Memorias, C-35; Real Sociedad Económica Valenciana de Amigos del País, 1801. Y con carácter más actual Abellán Contreras, F.J., *Regulación normativa de las zonas húmedas en el Reino de Valencia. Estudio histórico jurídico sobre la desecación y colonización del "Sinus Illicitanus" (XVII-XX)*, Alicante, Dykinson, 2019, passim.

[29] Chalmeta y Marugán, *Formulario notarial y judicial andalusí*, op.cit., p. 255

[30] Chalmeta-Marugan utilizan este término al explicar los formularios en materia de posesión, op.,cit.,p. 576.

se nivelen a la hora de exigir responsabilidad al dueño, puesto que el factor humano no tiene el mismo grado de implicación en el siniestro que en la desgracia, citando por caso; de hecho, la responsabilidad (*muṣība*) no es "imputable a la tierra" como dice la jurisprudencia. Aquí cabe preguntar si en aquel tiempo la remisión al cielo o a la naturaleza exoneraban al propietario en algún supuesto, ya que la sequía sí era "imputable a la tierra", pero nada dice de la inundación o avenida de agua, lo que denota una separación entre la fuerza mayor (sequía o lluvia) por las que era "obligatorio reclamar", y siniestralidad en tanto que daño sufrido por la inacción o falta de previsión individual o colectiva ante fenómenos naturales de cuya amenaza se tenía noticia[31].

En cuanto a la aclaración del concepto "siniestro" la precisión viene en otra fórmula al tratar del mismo sobre frutos agrícolas[32]. Si en el supuesto de inundación de terreno el autor cordobés no termina de incluir entre los supuestos de fuerza mayor la acción de la lluvia, y por tanto las inundaciones, en este otro "continuos aguaceros" o la lluvia. Tanto desde su punto de vista al redactar el modelo de fórmula como en base a la doctrina, son casos de siniestro (*ğā'iḥa*), provocados por "fuerza mayor", por agentes atmosféricos. Y señala que ese carácter (fuerza mayor) no se puede asignar a la que *se deriva de acciones humanas*. No obstante estas matizaciones, lo cierto es que Ibn al-'Aṭṭār utiliza el término siniestro indistintamente con el significado de "fuerza mayor", en distintos modelos de escrituras para reclamaciones por circunstancias diversas, como la mengua del agua[33], los siniestros ocasionados por lluvias ininterrumpidas y continuos aguaceros (*bī tawālī al-amṭār wā itasāl al-gayūš*)[34].

El término *ğā'iḥa* es conceptualizado por Maíllo también como calamidad, catástrofe natural, al margen de siniestro; en realidad sucesos o circunstancias que cuando inciden sobre un producto o propiedad sometido a régimen contractual abre una expectativa de derecho para la persona que sufre daños o males de carácter económico; y de ahí la posibilidad de demandar para verse exentos del pago de rentos o censos. La pregunta es si ese mismo derecho se reconoce cuando tales daños o males tienen o provocan efectos no económicos.[35] Siendo este punto fundamental para explicar la responsabilidad del hombre, de la acción o inacción humana en la previsión de ciertas catástrofes que, si bien se pueden ver acentuadas o incrementadas por los agentes atmosféricos, también han de ser previstos por el hombre. De modo que la acción humana debería contribuir a paliar el siniestro o catástrofe, bien modelando el paisaje, mejorando infraestructuras, pero sobre todo manteniendo la infraestructuras en perfecto estado para no estorbar ni impedir el discurrir del agua, como así se recogerá en las ordenanzas posteriores.

Ahora bien, parece que el interés del jurista en la regulación del procedimiento para reclamar se centra en determinar el valor de la ganancia o pérdida de las cosechas una vez verificado el daño o el impedimento: así las cosas, el concesionario quedaba exento del pago por aquello que no había recibido de la naturaleza, ante la catástrofe acaecida. De hecho, la inundación se aborda como causa que impide realizar labores de cultivo durante la temporada en que estas se pueden realizar. Y he aquí que se distinguen dos supuestos: que se haya podido obtener algún beneficio, parcial y reducido con el que no se puede hacer frente a la obligación de pago por la concesión; o que, por el contrario, se haya podido cultivar en alguno de los periodos (aquí de nuevo la importancia del calendario) destinados a la siembra, y evaluada la ganancia (estimada) se pueda exigir el pago del derecho del concedente. Importante es que al término de esta fórmula se evidencia el carácter ejemplarizante de la misma para otros supuestos, lo que deja abierta la puerta a la aplicación por analogía (*qiyas*)[36].

[31] Idem, op.cit., p. 607.
[32] Idem, op.cit, mod. 153 "Escritura de siniestro [ocurrido] en unos frutos comprados", p. 609-610.
[33] Chalmeta y Marugán, *Formulario notarial y judicial andalusí*, mod. 156, p. 613, y vid. p. 391 ed. Árabe.
[34] Idem, mods. 156 y 153; op.cit., pp. 391 y 384 respectivamente.
[35] Maíllo Salgado, Diccionario de derecho islámico, p. 89.
[36] Cabría ahora determinar en qué supuestos no regulados expresamente en su compendio, de ahí la necesidad de emplazar

Si el siniestro era por fuerza mayor derivada de agentes atmosféricos no se tenía derecho a reclamar nada, pero la persona que lo sufría quedaba exenta de pagar obligaciones. La reclamación por los daños sufridos correspondía al concedente, y de ahí que fuera admisible reclamación de la otra parte. Pero si el siniestro se debía a la acción (o inacción) humana –al margen de la incidencia de fuerza mayor o factores medioambientales– había que determinar qué es lo que se esperaba hubiera hecho o cómo tendría que haber mantenido la infraestructura para no exigirle responsabilidades en el supuesto de que, acometidas éstas, hubiera sobrevenido el daño irremediablemente; en definitiva, para que no fuera considerado culpable por negligente, abandonado o irresponsable.

En esos casos de siniestro por fuerza mayor, la pérdida de más de un tercio sí generaba el derecho del concesionario a no pagar al concedente por la cantidad que estaba obligado; no así si la perdida era inferior a esa proporción, como se explica en el supuesto de siniestro en un campo de alcachofas, en base a la doctrina y ante siniestro por robo, "lluvias excesivas" o daños por el paso de un ejército[37].

4. ACCIONES Y ACTUACIONES SUSCEPTIBLES DE EXIGENCIA DE RESPONSABILIDAD EN LA PREVISIÓN DE DAÑOS POR INUNDACIÓN (LA HUELLA JURÍDICA)

Remitiéndonos de nuevo a los tiempos más antiguos en los que se abordan estas mismas cuestiones muchas son las acciones o empresas que se debían acometer, bien por iniciativa propia con el fin de mantener los cursos de agua bien dispuestos y libres de impedimentos, o por mandato de los guardas o de los acequieros en el caso de éstas. El mantenimiento de almenaras y aliviaderos del canal (*manāhir*), o de los azudes o presas que están datadas desde antiguo, como la citada por al-'Uḏrī en la acequia que sangraba el río Segura"[38]; y un segundo canal (*ŷadwal*) se excavó para dirigirlo hacia el norte, y de ahí su nombre de Acequia Aljufia[39]; ambos con almenaras o aliviaderos del canal (*manāhir*).

La legislación foral valenciana promulgada desde el momento de traspaso de soberanía a los reyes cristianos, en concreto del área en la que con mayor arraigo se implementó el sistema de regadío por gravedad, muchos fueron los supuestos en los que la intervención de la autoridad competente, bien a pie de acequia o bien en el ámbito del consejo local, conocieron sobre inundación de predios o infraestructuras situadas en niveles inferiores e inundables; es el caso de los molinos cuya protección obligaba a desescombrar y mantener las acequias limpias y "desmondadas", y construir azudes, a modo de barreras o presas (así como señal en el agua en la boca del cárcavo de fuera) para evitar siniestros[40].

Pero no solo era importante estar a pie de acequia para visualizar las obras de reparación, limpieza y mantenimiento, sino "reconocer" la infraestructura una vez se diera por finalizada la obra, o desbrozado. Esa limpieza era obligada en todas las cuencas y brazales, desde tiempo inmemorial y objeto de denuncia cuando en 1623 –ya expulsados la gran mayoría de los moriscos no obstante la permisión para un porcentaje reducido estante en el medio rural–, se elevaron quejas al rey sobre el

al lector a una segunda parte en este estudio; sobre lo aquí explicado CHALMETA y MARGUÁN, *Formulario notarial y judicial andalusí*, p. 608.

[37] Chalmeta y Marugán, *Formulario notarial y judicial andalusí*, mod. 154 "Escritura de siniestro [ocurrido en un campo] de alcacel", p. 611.

[38] Torres Fontes, J., *Colección Documentos para la Historia de Murcia*, doc. LXXXIII, 4 de mayo de 1268, Jerez, Alfonso X al concejo de Orihuela. Confirmando acuerdo del concejo sobre las presas.

[39] Sobre esta denominación Pocklington remite al término *kawṯar*, cuyo significado es "río del Paraíso", y que aplicó al-Qarṭāyanī a la citada acequia mayor; vid. Pocklington, "Lexemas" Ob.cit. pp. 263/4.

[40] Fueros y Observancias, 106 a (dado por Jaime I en 1247).

abandono y *descuido en la limpieza de acequias y azarbes*, con grave *perjuicio de la agricultura e intereses reales y particulares*, que aun no siendo explícitamente descritos se coligen de lo expuesto hasta aquí[41]. En el caso de la acequia de Mestalla se describe la última revisión del trabajo, con aviso previo a todos los implicados, para que a la vista de lo que determinaran los veedores, y realizaran "cuatro hombres e trabajo, con hoz y legón" no pudieran argumentar no tener noticia de lo que se iba a hacer, y así poder evitar el pago de las costas[42]; y que en el caso de la acequia de Favara se dice debería ejecutarse "es fasa ab tota perfecció", "ab tot cuidat y frecuencia" para evitar ser acusado por omisión o culpa[43]. Asimismo, en la acequia de Rascaña debiendo proceder a esta visura diez días después de la monda de los brazos de la acequia, mediando pregón y ejecutándolo por cuenta de ellos si incumplían lo mandado; y en ese caso el síndico podría mandar veedores que alquilasen peones reservando para el veedor salario doble a cargo de los contraventores[44]. Una obligación de constante revisión que competía también al guarda, una vez por semana, debiendo tomar nota de "daños y ruinas" que ocurrieran, dando cuenta al síndico para que "providencie su remedio".

Diversos sujetos intervenían en una estructura orgánica y coordinada para garantizar la eficacia de un sistema de arraigo, Interesa en este punto resaltar el papel que el escribano labrador tuvo con el fin de constatar, por el medio más permanente desde tiempo inmemorial, la efectiva actuación en beneficio del mantenimiento de infraestructuras en condiciones apropiadas para evitar daños. Las "mondas", el "desbardado", y "demás haciendas que ocurran hacerse"[45] como el caso de cortar las cañas para que "no hagan estorvo" al paso del agua, debiendo sacarlas del curso de la misma, al igual que la broza; y todo debía recogerse en un cuaderno en el que "con claridad y fidelidad note todo el gasto de las mondas y haciendas". Y también el frontalero debía sacar las raíces de las cañas, pero no solo mondar sino también limpiar la "riba de la acequia", lo que había que hacer todos los años en el mes de marzo y en el de agosto en los "acueductos de aguas vivas", lo que se anotaba en el padrón[46]. Lo importante, sin duda, era hacerlo, pero también saber cuál era el coste para cargarlo a quien correspondiera. Y este es un punto también hoy controvertido.

La limpieza suponía tener las acequias "empostadas" para la acequia fuera siempre "engaltada o encarrilada" es decir, para que el agua fluyera sin impedimento alguno, y como se especifica en las Ordenanzas para la acequia de Favara, "ab tanta aygua com puga portar"[47]; pues de lo contrario rebasaría el nivel y provocaría sorriego o daños a los terrenos colindantes[48].

Con carácter anual el veedor de la acequia no solo realizaría la función que definía el cargo: ver que se había desbrozado en tiempo y forma, sino también llevar registro de lo que habían realizado, *cequieros* y *frontaleros*[49]. Una vez más el registro de actuaciones era garantía para exigir responsabilidades en caso de daños sobrevenidos o ante demanda de terceras personas. Labores de mantenimiento para las que también se requería –dada la importancia de la reparación- la "visura" del síndico procurador general y de los *cequieros*[50]. Y pasado el tiempo esa función se seguía reconociendo a los propietarios del terreno, quienes a su costa debía proceder a retirarlos, y en ausencia de actuaciones era la "Autoridad" quien debía conceder tiempo prudente para su retirada[51].

[41] Memoria sobre los riegos de la Huerta de Orihuela, opc.it., Séptimo punto, p. 107.
[42] Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, Capítulo LXXXVIII, pp. 149-150.
[43] Capitols e ordinacións de Favara, Capitols respectants al cequier, p. 205 y 206.
[44] Ordenanzas de la acequia de Rascaña, ord. 53, pp. 292/3.
[45] Ordenanzas de la acequia de Mislata", op.cit., Ord. XXXIII, y XLIX, pp. 54y 61 respectivamente.
[46] Ordenanzas generales de la azud de Alfeytamy; Cfr. Memoria sobre los riegos de la huerta de Orihuela, pp. 124/5.
[47] Capitols y ordenacions de Favara, Capitols respectant al ofici de sindich, p. 194.
[48] Ordenanzas de la acequia de Mislata", op.cit., Ord. XL, p. 57. Igualmente, en el caso de las Ordenanzas de la acequia de Rascaña, opc.it.mp p. 276; debiendo hacerlo "a su tiempo hacia delante la acequia".
[49] Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, capítulo LXVII, p. 143.
[50] Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, capítulo, LXXV, pp. 147/8.
[51] Así se recoge en la Ley de Aguas de 29 de diciembre de 1876, mediante real orden de 17 de enero de 1877; Saleta y

Pero la previsión suponía también "obligación de cuidar se hagan todas las obras que en la junta de electos se determinara", como así disponían las Ordenanzas de Mestalla; el como ya se ha explicado, el cuándo era ante el rompimiento de la acequia. Un rompimiento que podía tener causa en el mal estado de la acequia, del curso de agua por entorpecimiento o falta de cuidado. Y en ese caso la Junta de electos determinaría lo más conveniente para su arreglo, mediante deliberación. Es decir, tomando parte en la decisión de lo que mejor conviniera todos los corresponsables y usuarios representados en la misma. Interesa en este punto destacar que el síndico labrador asumía nueva responsabilidad: comprobar personalmente que las obras se ejecutaban cómo estaba mandado por la junta, evitar fraudes (uso de materiales y labores correspondientes) y procurar el ajuste del coste a la efectiva reparación, pues repercutiría sobre todos los usuarios, el "*común*" y regantes[52].

Entonces como ahora la compleja y profusa red de canalización del agua exigía un cuidado metódico, programado y constante o periódico. Ahora, si cabe y por causa de los residuos plásticos entre otros, esa tarea se hace más trabajosa; se trata de un plus a la limpieza de cañas, cieno o tarquín, deslomado, también "yerbas de ninguna clase, ni tampoco piedras, escombros ni otras materias que puedan embarazar el agua", fango, estacas o tablas, ni cortarse con "cercas y habitaciones" como se prohibía en la acequia de Alfeytamí desde tiempo inmemorial, y no obstante seguía y sigue haciéndose sin que sean definitivamente removidas (es el caso del testimonio documental de 1673 sobre *las obras en el cauce para reducir los daños que ocurren en las riadas con especial referencia al azud del molino de Alfaytami, causa de la ruina de Almoradí* y como dice el texto "para precausion delas continua avenidas del rio y daños intolerables que nos hacen")[53]; obligación para *todos los regantes*, no a su libre albedrío, sino cuando el síndico así lo indicara. Y lo más importante, siempre a su costa cuando esa maleza, riba o tarquín se encontrara en la orilla o margen de la acequia[54]. La presencia de esos materiales podía ser por causa de utilidad, y así se prevé en la Ley de Aguas de 1876 respecto al aprovechamiento de las aguas públicas para riegos, pues a los dueños de los predios lindantes con cauces públicos de caudal no continuo les estaba permitido construir sin necesidad de autorización, malecones de tierra y piedra suelta o presas móviles y automóviles (art. 177) como desde tiempo milenario, con la finalidad de disponer de agua en zonas de ramblas, rieras, barrancos o semejantes.[55]

De manera que el riesgo de desprendimiento y por ende de transporte de esos materiales, de forma involuntaria en épocas de aguas bravas, era el alcalde –como desde tiempo inmemorial lo fue en las cuenca del río Segura, citando por caso-,[56] quien de oficio o por instancia de parte, una vez comprobado el peligro debía mandar "al que los construyó que los modifique en cuanto sea necesario

---

Jiménez, J.M., *Tratado de Aguas, expropiación forzosa, obras públicas, agricultura y colonias agrícolas*, Madrid, 3º ed., 1879, pp. 51-114; vid. art. 51, p. 64.

[52] Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, ob.cit., capítulo XL, pp.126/7.

[53] Ordenanzas de la acequia de Mislata", op.cit., Ord. XLVII, p. 60; Capitols e Ordinacions común e cequia de Favara, Capitols del que regeuen de parades,p. 221. Ordenanzas generales de la azud de Alfeytamy, 1; Cfr. Memoria sobre los riegos de la huerta de Orihuela, p. 131.Jiménez Alcázar, J.F., y Abad Merino, M., "Ausencia y presencia del agua en el Sureste de la península Ibérica (ss.XIII-XVII), en *El agua en el imaginario medieval,* Mª Isabel de Val Valdivieso (coord.), Alicante: Universidad de Alicante, pp.109-134, vid. Apéndice documental II. Ya en 1673 se atribuye la merma poblacional, de 600 a 60 vecinos, por la pobreza en la que se han visto sumidos ante la abundancia de agua tras la construcción de azud.

[54] Ordenanzas de la acequia de Mislata", op.cit., Ord. LI, p. 62. En el caso de Rascaña la riba cavando el cieno, tierra o tarquín era penado con una libra, y dos para el que escorriera en la acequia, y de dos a cinco sueldos si se introdujeran alimañas, vid. Ordenanzas de la acequia de Rascaña, ord. 57, p. 295.

[55] Ley de Aguas de 1876, op.cit., p. 92.

[56] Memoria sobre los riegos de la Huerta de Orihuela, opcit., p. 109.Y con ello se da continuidad a la práctica y normativa entre los andalusíes *¡…hib as-s…quiya* o sabaséquia, zabacequia, también "juez de aguas" vid. Ibarra Y Ruiz, P., *Estudio acerca de la institución del riego en Elche*, Madrid: Jaime Ratés, 1914, p.98 y Vidal Castro, F., "La transmisión del uso y gestión del agua de al-Andalus al mundo cristiano" en *las Huellas del islam*, Huelva: Universidad de Huelva, 2008, p. 180.

para desvanecer todo temor, o si fuera preciso que los destruya" (art. 177).[57] Aquí una vez más, la autoridad local se erige en representante de esos "intereses comunes", que en épocas anteriores se subsumía en el concepto "común".

Y es aquí donde cabe hacer un inciso sobre este término "común" citado en varias ocasiones, pero no explicado en su contexto. De manera específica conviene explicar la importancia del término "común" que se incluye explícitamente en la mayoría de las Ordenanzas de las distintas acequias y en los Capítulos que regulan la administración y cuidado de las infraestructuras hidrológicas en perfectas condiciones para el fluir sin embarazo del agua. Un término no circunscrito solo a los regantes, sino a todos los usuarios; ese concepto de comunidad afectada por las mismas necesidades (el uso del agua para cualquier fin) y comprometida en el mantenimiento del servicio (procurando su limpieza y asumiendo los trabajos para que así fuera, así como el coste de su ejecución). Se trata de la comunidad a la que de forma indirecta alude el art. 126 de la Ley de Aguas de 1876, y que de forma genérica se refiere a "todos" aquellos que necesiten el agua para usar de ellas para beber, lavar ropas, vasijas o cualesquiera otros objetos, bañarse, y abrevar o bañar caballerías y ganados con sujeción a los reglamentos y bandos de policía municipal; así como para uso doméstico, fabril o riego respecto a las "apartadas artificialmente de sus cauces naturales y públicos" (art. 127)[58]; en aquel tiempo como antaño la autoridad local que en el ámbito de las comunidades bajo soberanía musulmana era competente en los asuntos de *hisba* y en el de las comunidades bajo soberanía cristiana se denominaba *consejo* o *ayuntamiento;* y en efecto desde los tiempos de Alfonso X para el caso de la cuenca del río segura la elección de la (máxima autoridad *en la huerta* a pie de acequia era el *juez sobreacequiero* "elegido para este destino por el ayuntamiento de dicha ciudad[59]. Conceptos al que se irán superponiendo otros de distinto carácter y connotación que introdujeron nuevas instancias a la hora de exigir responsabilidades por las actuaciones contrarias a las normas u ordenanzas en materia de aguas, es el caso de las "comunidades de regantes" o "sindicatos de aguas", que corriendo el tiempo se veían sometidas a la jurisdicción del "gobernador" como máxima autoridad en las cuestiones de regantes sobre aprovechamiento y disfrutes de las aguas, y en detrimento de las pretensiones de las Diputaciones provinciales, por más que tuvieran un carácter eminentemente territorial o circunscrito a una provincia[60]. Es el mismo concepto que aparece en el articulado de la actual Ley de Aguas referida a la comunidad de usuarios para la titularidad de las obras de utilización y construcción (art. 86) y de la utilización conjunta de las aguas (art. 87). Y al margen de ese concepto connotado por cierto grado de "patrimonialización" que es el *de Mancomunidades, Consorcios u otras entidades semejantes* (art. 89) y que tan lejos queda de la acepción que el término "común" tiene en las Ordenanzas vigentes[61]. He aquí un motivo de conflicto que trasciende lo estrictamente conceptual para inmiscuirse en el plano económico y político.

---

[57] A finales del XIX, alcalde, Gobernador civil y Ministerio de Fomento eran las piezas claves en la exigencia de responsabilidades por el buen aprovechamiento, el mantenimiento de infraestructuras como presas o instalación de bombas para el riego –evidentemente no tan generalizadas como en la actualidad con motivo de la agricultura intensiva que pretende llevar el agua donde de forma natural nunca llegaría, ocasionando efectos colaterales que agostan a la agricultura extensiva del regadío tradicional levantino-, o construcción de presas o azudes que supusieran derivación de más de 100 litros por segundo. Un modelo de carácter centralista que pasado el tiempo ha quedado obsoleto ante la presencia de un modelo descentralizado, y descoordinado respecto a las distintas cuencas, con el consiguiente efecto de desconcierto, sobre todo en el momento de exigencia de responsabilidades por actuaciones indebidas u omisiones. Vid. Ley de Aguas de 1876, arts. 178, 181 y 185.

[58] Ley de Aguas de 29 de diciembre de 1876, op.cit., p. 81.

[59] Memoria sobre los riegos de la Huerta de Orihuela, op.cit., Séptimo punto, p. 107

[60] Real Orden de 2 de diciembre de 1872, Cfr. Saleta, Tratado de Aguas, ob.cit., pp. 477/8.

[61] Situación derivada también del fin del plazo de concesión de aguas a Sociedades o empresas para regar tierras ajenas mediante el cobro de un canon, y que aconteció en 1975; no obstante, la concesión a perpetuidad del agua a los propietarios de las tierras de regadío, a título individual o colectivo se hiciera en la Ley de Aguas de 1876, según lo dispuesto en el art. 188. La distinción entre tierras con agua concedida a perpetuidad y tierras sometidas a "pago por canon de agua", vid. Ley de Aguas de 1876, op.cit., p. 94.

Retomando la referencia anterior al papel de la autoridad local en la exigencia de responsabilidades, según la legislación decimonónica, interesa en este punto indicar que el procedimiento a seguir se resume en dos fases: la reclamación de los particulares –usuarios en todas sus facetas y modalidades– ante la autoridad local (la misma que debía exigir la remoción o modificación), pero solo si se "preveía la amenaza de daños"; y en segundo lugar, siendo el daño evidente, los tribunales de justicia. Y esto es así porque en sede judicial competía además exigir responsabilidad a la autoridad local por no haber previsto, y tomado las medidas pertinentes; una suerte de exigencia de responsabilidad por dejación de funciones.

Es esta una cuestión de sumo interés para el caso que nos ocupa; máxime cuando en un entramado tan complejo como el que se ha desarrollado entorno a la distribución y gestión del agua, la responsabilidad última se quiere trasladar al eslabón último de la cadena, los regantes para el caso de los cauces que desembocan en nuestro Mar Mediterráneo. Una traslación que tiene por objeto exonerar de toda culpa a los responsables intermedios, quienes deben rendir cuentas "ante el común" y asumir el estricto cumplimiento de las competencias asignadas hasta sus últimas consecuencias.

La corresponsabilidad entre los distintos usuarios del agua y el mantenimiento de las infraestructuras en perfecto estado, en estado que permitiera el correr y fluir del agua sin impedimento hasta la desembocadura de los ríos en el mar, es patente en la legislación consultada entre regantes (dueño o arrendador/frontalero), guarda, veedor, síndico y acequiero, arrendadores de la *monda*[62]. Una responsabilidad que se exige no solo respecto al mantenimiento en perfectas condiciones no solo en el ámbito de las riberas sino también, como define el art. 6 de la Ley de Aguas, en las zonas en que las condiciones topográficas o hidrográficas hagan necesaria la intervención humana para seguridad de personas y bienes; de ahí la expresa referencia, ya desde tiempo inmemorial, al uso indebido de residuos para hacer parada y beneficiarse del agua, en el caso de la tanda que le correspondiera; una astucia consistente en hacer una parada o presa con el lodo que había que retirar[63]. Lo interesante en este punto es que esa responsabilidad se exigía en el momento en que se producía el daño pero no se limitaba tan solo a ese tiempo o al punto concreto en el que se verificara el daño, sino que se prolongaba en el tiempo y sobre un espacio determinado a lo largo de las acequias, como por ejemplo se constata en la de Mestalla, debiendo supervisar y controlar la monda de forma progresiva en el espacio y sucesiva en el tiempo[64]. Importante aquí subrayar la continuada supervisión sobre el terreno, dando estabilidad al sistema de control constante y celoso del estado de las infraestructuras.

Y el regante, último en el eslabón, asumía también la responsabilidad cuando rompía dique, fila de la acequia, no cerraba portillos y provocaba se sorregara el campo del vecino; en el caso de la acequia de Rascaña la pena era elevada, en comparación con otras ya señaladas, pues debía pagar 25 libras divididas en tres partes: una para la cámara, y las otras dos en tres partes, una para el denunciador, la otra para la comuna y la otra para el síndico; reparto que afectaba a la práctica totalidad de la penas pecuniarias impuestas[65]. Una cantidad elevada si se tiene presente que el que desaguara la balsa de cáñamo en la acequia (con todos los desperdicios que comportaba, primer escombro natural y

[62] En este caso la responsabilidad se exige a los que así lo hubieran asumido n las escrituras de arriendo, como se evidencia en las "Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, aprobadas por el real y supremo consejo de Castilla en 9 de junio de 1771", Capítulo XX, p. 114/5; según lo dispuesto en 1733 y ratificado por la Junta general en 1734.
[63] Ordenanzas de la acequia de Mislata, op.cit., Ord. LV, p. 64; ídem, Ord. LX, p. 65 para el que sorregare. La pena de 3 libras sigue siendo la constante en este caso.
[64] Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, capítulo XLVII, pp. 130/1. Y sobre la supervisión por trechos varios capítulos, LIV, LV, LVI, LVIIII respecto a los molineros; pp. 135-137.
[65] Ordenanzas de la acequia de Rascaña, Ords. 34, 37, pp. 283/4.

amenaza ecológica) o broza, cañas y sus raíces se veía obligado al pago de 3 libras, si no procedía a la limpieza a su costa[66].

También el guarda podía ser demandado si ante la avenida de agua, debida al infortunio del tiempo meteorológico no tomara las medidas oportunas: "In continente" antes de que se produjera el daño *ans que reba dan*, cerrar los tornos e la acequia para que no entrara agua, evitar los daños y el enrunado de la misma, bajo pena de 6 libras la primera vez, de doce la segunda y de privación de oficio in perpetuum[67].

La responsabilidad de los usuarios y de los regantes era fundamentalmente la del mantenimiento en condiciones óptimas de los brazos de las acequias. Se trata según disponen las Ordenanzas de Tormos de tenerlas bien "*modadas y descubiertas sus fitas, removiendo todo entorpecimiento ocasionado por sulsidas o árboles y demás que puedan entretener el rápido curso de las aguas*"[68]. Pasados ya más de ciento setenta años se colige que entonces como ahora los ríos bajaban en ocasiones "rápidos" y que en "épocas de abundancia de agua", los impedimentos eran los mismos que en la actualidad, a lo que se suma en este momento el exceso de escombros de origen humano, algo a lo que toda esta documentación no alude[69].

En definitiva, un sistema de corresponsabilidades concatenadas en las que de forma sucesiva se asumía el protagonismo en el mantenimiento en condiciones óptimas para evitar daños mayores, y cuyas medidas coercitivas y el modo de implementarlas es también materia de interés, y complementario de este trabajo[70].

[66] Ordenanzas de la acequia de Rascaña, Ords. 43, 44 y 46, pp. 287-289; como tampoco "rabechar" o utilizar agua de la acequia para mondar o limpiarla bajo pena de 25 libras; vid. ord. 47, p. 289.
[67] Capitols y ordinacions de Favara, Capitols del ofici del guarda, pp. 216/7.
[68] Ordenanzas para el buen gobierno y justa distribución de las aguas de la acequia de Tormos, Capítulo XII, "Obligaciones del síndico labrador", p. 78. Y cap. XVII, sobre las obligaciones del guarda en épocas de abundancia de agua, op.cit., p. 80.
[69] Véase Ley de canales de riego de 20 de febrero de 1870 y su Reglamento de 20 de diciembre.
[70] Ordenanzas que deberán observar los interesados en la acequia de Mestalla, capítulo C, p. 163. Por razones de extensión se dará a conocer en adelante.

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS ESPAÑOLAS SOBRE INUNDACIONES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL: ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA *WEB OF SCIENCE*

Andrés Díez Herrero
Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España
andres.diez@igme.es
https://orcid.org/0000-0003-1106-191X

Julio Garrote Revilla
Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, España
juliog@geo.ucm.es
https://orcid.org/0000-0002-7727-8014

RESUMEN

La producción de publicaciones científicas españolas (escritas por autores españoles o que tratan de casos de estudio en España) sobre inundaciones en sentido amplio se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, a la par de los informes técnicos, cartografías, manuales y guías metodológicas. Además, también se ha incrementado su repercusión y difusión en el ámbito internacional a través de los artículos en revistas científicas de prestigio contenidas en las principales y más selectivas bases de datos bibliográficas de distribución mundial, como *Web of Science* (Clarivate) o *Scopus* (Elsevier). En el presente estudio se realiza un análisis bibliométrico básico de esta producción científica española sobre inundaciones en la base de datos *Web of Science*, con la intención de observar sus características en el pasado (temáticas, ámbitos de investigación, evolución temporal) y tratar de predecir su evolución futura en los próximos años según los campos emergentes de tendencia creciente. Los resultados muestran cómo la producción científica sobre inundaciones en revistas internacionales de prestigio ha aumentado notablemente desde la década de 1990; y se concentra en el ámbito de las ciencias ambientales, producidas muy pocas instituciones científicas y académicas (CSIC, UB, UPC, UPV) y autores (Benito, Llasat, Batalla, Díez-Herrero, Comín, Bodoque); y en el futuro parece que se incrementará en campos de las ciencias sociales, como la percepción, resiliencia y las medidas naturales de gestión del riesgo de inundación.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la producción bibliográfica de una disciplina académica es un tipo de estudio que se ha prodigado notablemente en las últimas décadas, sobre todo en el ámbito de las ciencias sociales y humanidades; pero no tanto en las disciplinas de las ciencias de la naturaleza. Sin embargo, el análisis de los resultados de la bibliometría ofrece interesantes discusiones y conclusiones acerca de la evolución pretérita de una disciplina y sus previsibles tendencias futuras, útiles no sólo en el establecimiento de políticas científicas, sino también en la toma de decisiones por parte de los investigadores y gestores a la hora de establecer líneas prioritarias, programas y planes.

En el caso del estudio de las inundaciones en sentido amplio y para la producción científica española, llama la atención de ausencia de recopilaciones y análisis bibliométricos recientes; con la salvedad

de las recopilaciones y listados bibliográficos realizados para los catálogos de inundaciones históricas (CTEI, CNIH) o las guías metodológicas de organismos oficiales (Montalbán *et al.*, 2003; Díez-Herrero *et al.*, 2008; Sánchez y Lastra., 2011); los compendios de la producción científico-técnica sobre inundaciones hechas por algunos organismos, como el Instituto Geológico y Minero de España (Díez y Lain, 1998; Llorente *et al.*, 2006); o la evolución de la cartografía de inundaciones en España (Olcina y Díez-Herrero, 2016).

Sería una labor ardua e interminable realizar un análisis de toda la producción bibliográfica sobre inundaciones en España, comprendiendo tanto publicaciones en medios comunes (libros, capítulos de libros, artículos en revistas, comunicaciones y ponencias en actas de congresos científicos, folletos…) como los informes técnicos, proyectos de obra, manuales, dossiers, guías metodológicas, libros blancos, monografías, etc., muchos de ellos inéditos, producidos por organismos públicos (confederaciones hidrográficas, agencias del agua) y empresas privadas (consultoras de ingeniería, estudios y proyectos). Sin embargo, desde hace unas décadas, la producción científica de calidad internacional, sobre todo la de carácter académico relacionada con las universidades y los centros de investigación básica, suele relacionarse con su inclusión en bases de datos bibliográficas gestionadas por grupos editoriales u organismos públicos, que velan por unos criterios de calidad homogéneos (aunque cuestionados por determinados sectores de la comunidad científica) para la inclusión de una publicación en dichas bases de datos. Entre ellas se encuentran algunas más populares, como *Google Schoolar* (Google), *Latindex*, *Dialnet*…, pero sobre todo *Scopus* (Elsevier) y *Web of Science* (Clarivate; en adelante WoS).

Por todo lo anteriormente expuesto, y ante la imposibilidad de abarcar toda la producción científica española sobre inundaciones, se realizará un análisis bibliométrico sobre las publicaciones contenidas únicamente en las bases de datos de la WoS, para interpretar los resultados del pasado y avanzar posibles tendencias futuras en el ámbito del estudio científico de las inundaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La *Web of Science* (WoS; anteriormente conocida como '*Web of Knowledge*', WoK) es una plataforma web que suministra acceso por suscripción a seis grandes bases de datos bibliográficas interconectadas ('*Science Citation Index Expanded*', '*Social Sciences Citation Index*', '*Arts & Humanities Citation Index*', '*Emerging Sources Citation Index*', '*Book Citation Index*', y '*Conference Proceedings Citation Index*') y varias bases de datos regionales (Latinoamérica, China, Corea, Rusia) que proveen datos integrados de citas para muy diferentes disciplinas académicas a nivel mundial. Originalmente fue producida por el '*Institute for Scientific Information*' (ISI) pero actualmente está mantenida por la empresa Clarivate Analytics (previamente propiedad intelectual y negocio científico de Thomson Reuters; Clarivate Analytics, 2020a). La colección nuclear de la WoS ('*Web of Science Core Collection*') contiene más de 1.700 millones de referencias citadas desde más de 155 millones de registros, abarcando más de 34,000 revistas.

Se ha escogido la WoS como base de datos a analizar frente a otras como *Scopus* (Elsevier) o *Google Scholar* (Google), porque es indiscutiblemente la mayor base de datos de citas disponible. Además, es la más selectiva en la inclusión de títulos de revistas científicas en sus conocidas listas de '*Journal Citation Reports*'; y las analíticas de la WoS son las fuentes más certeras y precisas para la evaluación de la investigación (Clarivate Analytics, 2020b). Por supuesto, las bases de datos de la WoS están focalizadas en un tipo de publicaciones basadas en la actividad académica (procedente de universidades y centros de investigación) y sus registros están sesgados a revistas científicas en idioma inglés, derivados de las principales editoriales académicas (p.e., Taylor & Francis, Elsevier, Nature-Springer); e ignora la gran masa de las revistas de ámbito nacional e internacional no incluidas en la WoS y la denominada 'literatura gris', procedente de la aplicación técnica de esa investigación

a la gestión (administraciones públicas) y a la práctica empresarial (consultoras). Pero la WoS contiene las bases de datos revisadas con mayor homogeneidad, lo que evita la necesidad de eliminar redundancias y registros duplicados, que sí que contienen otras bases de datos bibliográficas. A la vez, la WoS garantiza también homogeneidad en la calidad de los trabajos incluidos, ya que todos ellos han sido revisados en un proceso de revisión por pares con garantías (punto clave que no siempre satisface la 'literatura gris').

Por todo lo anteriormente expuesto, se ha consultado la '*Core Collection*' de la WoS y se han extraído varios miles de registros bibliográficos usando búsquedas para llevar a cabo un análisis bibliométrico clásico mediante las herramientas disponibles en el menú de Análisis de resultados de la WoS ('*Results Analysis*'). Estas herramientas de análisis incluyen los campos (Fig.1): Áreas de investigación, Años de publicación, Bases de datos, Tipos de documentos, Autores (también en chino), Países/regiones (también en chino), Títulos de procedencia (también en chino), Títulos de Congresos, Grupos y corporaciones de autores, Idiomas, Instituciones (también en chino), y Categorías generales. Para cada uno de estos campos de análisis de resultados los resultados se pueden mostrar como un mapa-árbol visual, como un diagrama de barras, o como tablas ordenadas por número de registros para un campo de selección; y se pueden descargar como ficheros de imagen (en formato .jpg) o ficheros de texto delimitados por tabuladores (formato .txt), respectivamente.

Todos estos datos tabulares han sido analizados empleando una sencilla hoja de cálculo y otras aplicaciones ofimáticas de análisis estadístico y representación de datos.

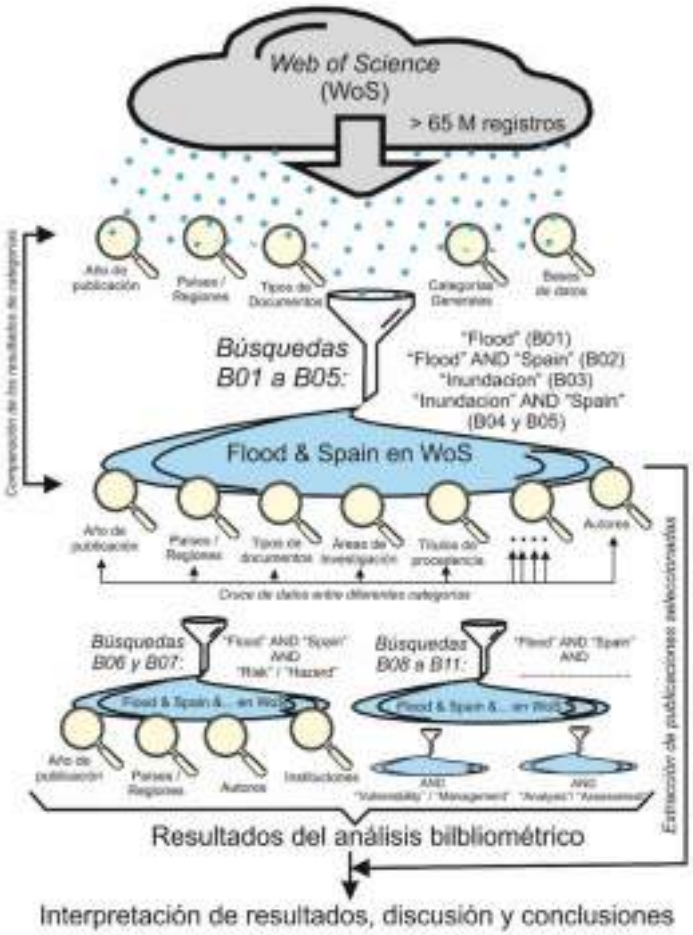


Figura 1. Esquema metodológico general de análisis bibliométrico llevado a cabo sobre las bases de datos de la WoS sobre estudios españoles de inundaciones en la literatura científica internacional.

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL SOBRE INUNDACIONES

Para extraer la muestra a analizar de las bases de datos de la WoS, en primer lugar se realizó una batería de búsquedas con combinaciones de operadores lógicos y palabras clave (en inglés y castellano) relacionadas con las inundaciones y España (Tabla 1).

B	COMBINACIÓN LÓGICA DE PALABRAS CLAVE	NR
01	Tema “Flood”	179.238
02	Tema “Flood” AND Dirección “Spain”	3.857
03	Tema “Inundacion”	837
04	Tema “Inundacion” AND Dirección “Spain”	34
05	Tema “Inundacion” AND País “Spain”	30
06	Tema “Flood” AND Tema “Risk” AND Dirección “Spain”	758
07	Tema “Flood” AND Tema “Hazard” AND Dirección “Spain”	365
08	Tema “Flood” AND Tema “Vulnerability” AND Dirección “Spain”	211
09	Tema “Flood” AND Tema “Management” AND Dirección “Spain”	1249
10	Temas “Flood”+“Risk”+“Analysis” AND Dirección “Spain”	381
11	Temas “Flood”+“Risk”+“Assessment” AND Dirección “Spain”	299

Tabla 1. Número de registros (NR) resultantes de las combinaciones de búsqueda (B) con palabras clave y operaciones lógicas sobre la base de datos de la WoS en relación con las publicaciones españolas de inundaciones. Fecha de búsqueda: 12-07-2020.

Como puede apreciarse en la Tabla 1, de todas las combinaciones de búsqueda realizadas, únicamente son de interés para este estudio y con un número de registros estadísticamente representativos (al menos superior al centenar), las numeradas como B02, B06, B07, B08, B09, B10 y B11; y sobre ellas se realizarán los correspondientes análisis de resultados.

3.1. Evolución temporal de la producción científica española sobre inundaciones en el ámbito internacional

Del análisis de las muestras de las búsquedas según el año de publicación se deduce que ha habido un incremento notable y sostenido en el tiempo del número de publicaciones españolas sobre inundaciones, tanto de forma general (B02) como para aspectos relacionados con el riesgo de inundación (B06), sus factores (B07 y B08) y sus aplicaciones a la gestión (B09). La Fig.2 muestra la evolución temporal en los últimos 24 años de ese incremento, pudiéndose observar cómo no se trata de un crecimiento lineal, sino con periodos de estabilización y otros de bruscos aumentos; como ocurre en la producción general sobre inundaciones (B02) entre los años 2007-2008 y 2013-2014 y 2018-2019, casualmente coincidentes con la aprobación de la Directiva europea de gestión del riesgo por inundaciones, el cierre de los estudios y mapas del primer y segundo ciclos de cumplimiento de la misma. Tampoco es homogéneo el crecimiento del resto de las combinaciones de búsqueda, siendo más significativo el incremento en el tiempo de las publicaciones sobre riesgo y la peligrosidad de inundación (B06 y B07) y menor y más tardío para la vulnerabilidad ante inundaciones (B08).

En situación intermedia se encuentran las publicaciones sobre gestión de inundaciones (B09), con una tendencia ascendente muy suave.

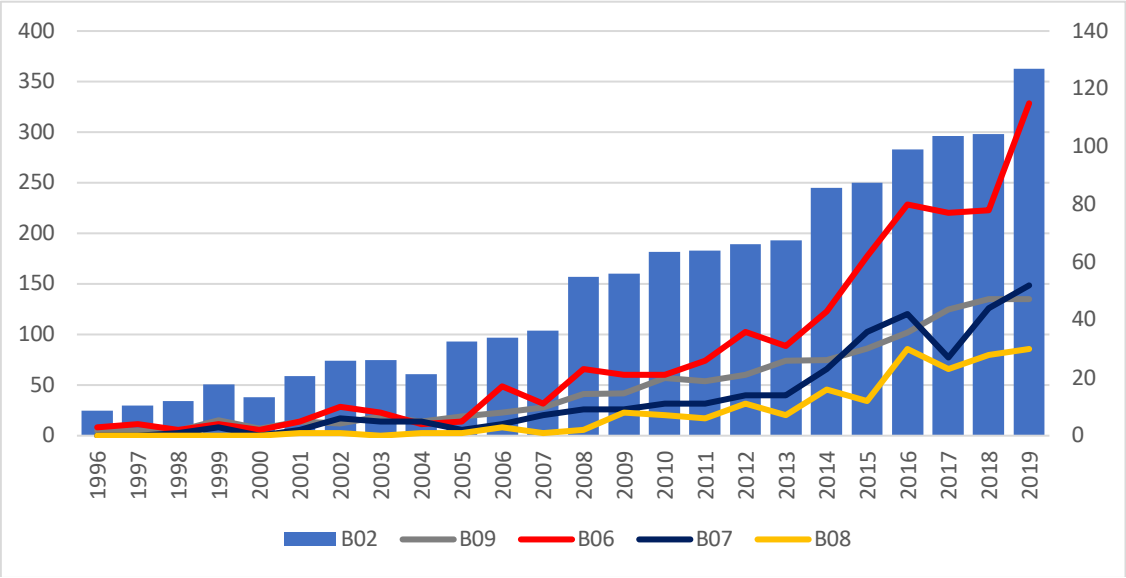


Figura 2. Evolución temporal en los últimos 24 años (1996-2019) de las publicaciones españolas sobre inundaciones en la WoS: B02 (Flood AND Spain; barras azules, eje ordenadas izquierdo); B06 (Flood AND Risk AND Spain; línea roja, eje ordenadas derecho); B07 (Flood AND Hazard AND Spain; línea azul oscuro, eje ordenadas derecho); B08 (Flood AND Vulnerability AND Spain; línea amarilla, eje ordenadas derecho); B09 (Flood AND Management AND Spain; línea gris, eje ordenadas derecho)

3.2. Distribución de las publicaciones en áreas de investigación, títulos de las publicaciones, procedencia de congresos e idiomas

El conjunto de las 3.857 publicaciones españolas sobre inundaciones (B02) ofrece la siguiente distribución en los diferentes campos de análisis:

- Áreas de investigación: la mayoría de las publicaciones se adscriben a áreas de las Ciencias de la Naturaleza, como: Ciencias ambientales y Ecología (55,3%), Recursos Hídricos (37,8%), Meteorología y Ciencias Atmosféricas (30,8%) y Geología (29,9%). Ninguna disciplina de las Ciencias Sociales y Humanidades aparece entre los 25 primeros puestos de las áreas de investigación.
- Títulos de las publicaciones: las publicaciones se reparten entre más de 1746 diferentes revistas, libros y actas de congresos, pero destacan los registros publicados en tres revistas: *Journal of Hydrology* (JoH; 3%), *The Science of the Total Environment* (STOTEN; 2,9%) y *Natural Hazards and Earth System Sciences* (NHESS; 1,9%); seguidas por *Water*, *Geomorphology* y *Catena*, con menos del 2% de las publicaciones. Sin embargo, para el caso de las publicaciones sobre riesgo de inundaciones el orden se invierte: NHESS, *Water*, JoH, STOTEN y aparece *Natural Hazards*, como es lógico.
- Procedencia en congresos: las publicaciones que proceden de reuniones científicas están muy repartidas entre 84 congresos distintos, entre los que sólo destaca por el número de registros el *PHEFRA International Workshop* (celebrado en Barcelona en el año 2003; con 7 registros) y el *36th IAHR World Congress* (con 5 registros).
- Idiomas: como es lógico, al ser mayoritario en las revistas y libros contenidos en la WoS, el 94,6% de las publicaciones españolas sobre inundaciones están en idioma inglés; pero llama la atención el alto porcentaje relativo de las que están en español (castellano; con un 6,1%), que deben corresponder a las revistas *Boletín de la AGE* e *Ingeniería del Agua*; seguidas por francés (1,0 %) y portugués (0,4%).

3.3. Producción científica por instituciones, países y autores

Apenas una veintena de instituciones académicas y científicas copan un alto porcentaje de la producción científica española sobre inundaciones (Tabla 2) entre las que destacan: el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC; líder en producción general de inundaciones y en estudios de riesgo, análisis, evaluación y gestión de inundación); la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC; líder en estudios de peligrosidad de inundaciones); y la Universidad de Barcelona (UB; líder en estudios de vulnerabilidad ante inundaciones).

	NÚMERO DE REGISTROS						
INSTITUCIONES	**B02**	**B06**	**B07**	**B08**	**B09**	**B10**	**B11**
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS CSIC*	**817**	**100**	35	14	**269**	**59**	**50**
UNIVERSITY OF BARCELONA*	325	59	38	**25**	82	31	19
POLYTECHNIC UNIV. OF CATALONIA*	228	72	**40**	21	66	36	38
UNIVERSITY OF ZARAGOZA*	196	39	25		50	15	16
COMPLUTENSE UNIV. OF MADRID*	189	33	19	11	32	16	10
UNIV. POLITECNICA DE MADRID*	183	44	15	6	81	21	14
UNIV. POLITECNICA DE VALENCIA*	155	51	17	6	65	36	20
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS	148	18	13	9	49		
UNIVERSITY OF GRANADA	123	20					
UNIVERSITY OF VALENCIA	121	21			38		
UNIVERSITY OF SEVILLA	118				36		
UNIVERSITAT DE LLEIDA	111				50		
AUTONOMOUS UNIV. OF BARCELONA	108	24	11	9	42		

Tabla 2. Número de registros de publicaciones españolas sobre inundaciones en la WoS para diferentes combinaciones de búsqueda, para las primeras instituciones del ranking de la búsqueda B02 (en negrita, institución con más registros; * instituciones con los nombres duplicados o múltiples formas de registro en las bases de datos).

La mayor parte de la producción científica española sobre inundaciones tiene coautores con país de filiación en España (99,2%), seguida por EE.UU. de Norteamérica (10,6%), Inglaterra (9,5%), Italia (7,8%), Francia (7,7%) y Alemania (6,7%). Llama la atención la baja coautoría con Portugal (3,9%), a pesar de ser países vecinos y compartir varios ríos internacionales de importancia.

Igualmente, una decena de autores copan la mayor parte de la producción de publicaciones científicas sobre inundaciones en el ámbito internacional (Tabla 3), entre los que destacan: Gerardo Benito (MNCN-CSIC; líder en estudios generales sobre inundaciones y la evaluación del riesgo); M. Carme Llasat (UB; líder en estudios de vulnerabilidad ante inundaciones); Andrés Díez-Herrero (IGME; líder en estudios de riesgo, su análisis y la peligrosidad por inundaciones); Francisco A. Comín (IPE-CSIC; líder en aspectos de gestión de inundaciones). Sin olvidar a otros autores destacados, como Ramón J. Batalla (ULl), Pilar García-Navarro (UZar), José M. Bodoque (UCLM), Mariano Barriendos (UB), Luis Mediero (UPM) y Félix Francés (UPV).

AUTORES	NÚMERO DE REGISTROS						
	B02	**B06**	**B07**	**B08**	**B09**	**B10**	**B11**
BENITO G	**89**	25	8		16	21	**17**
LLASAT MC*	60	20	19	**16**	19	13	7
BATALLA RJ*	56				20		
DIEZ-HERRERO A	48	**30**	**26**	8	22	**26**	15
GARCIA-NAVARRO P	45				11		
VERICAT D	42				16		
GARROTE L	41	16			18	8	6
COMIN FA*	38				**23**		
BODOQUE JM*	37	20	21	6	18	18	11
BARRIENDOS M	35	12	6			9	5
MEDIERO L	32	11				7	
ROMERO R	28						
FRANCES F	27	9				7	
MURILLO J	25						
RUSSO B	24	13	11			8	9
SABATER S	23						

Tabla 3. Número de registros de publicaciones españolas sobre inundaciones en la WoS para diferentes combinaciones de búsqueda, para los primeros autores del ranking de la búsqueda B02 (en negrita, el autor con más registros; * autores con los nombres duplicados o múltiples formas de registro en las bases de datos).

4. DISCUSIÓN

En primer lugar, la principal limitación de este estudio es haber analizado únicamente las bases de datos de la WoS, obviando otras bases de datos y fuentes bibliográficas científicas y técnicas: revistas nacionales (Ingeniería Civil, Revista de Obras Públicas, Cuaternario y Geomorfología, Investigaciones Geográficas, Boletín Geológico y Minero, Estudios Geológicos, Revista de la SGE, Geogaceta, Estudios Geográficos, iAgua…) e internacionales no incluidas en la WoS (Revista Iberoamericana del Agua); actas de congresos y reuniones científicas y técnicas (Reuniones Nacionales de Geomorfología; Jornadas de Ingeniería del Agua; Congresos, Jornadas y Coloquios de la AGE…); la producción técnica de los servicios de publicaciones de organismos públicos (DGA, CEDEX, IGME, DGPCE, DGC, CCS…) y universidades; y los informes y estudios del mundo empresarial y de la consultoría del agua y los riesgos naturales (INCLAM, DKV, SUEZ, TYPSA, INYPSA, EPTISA…). Seguro que de su análisis bibliométrico derivarían resultados e interpretaciones diferentes que enriquecerían este estudio, pero que exceden su modesto alcance y extensión.

Además, el uso de las búsquedas de combinaciones lógicas con palabras clave usando las herramientas de la propia WoS tiene como limitación que sólo se realizan búsquedas sobre determinados elementos de las publicaciones (título, filiación de los autores, resumen y palabras clave) y no sobre el conjunto del contenido completo de las mismas. Por ello es posible que algunos términos de búsqueda no aparezcan en esos elementos, pero sí en el cuerpo de la publicación; y al contrario, que aparezcan en el título o resumen, aunque no sea la temática principal de la misma; produciendo en ambos casos una distorsión y sesgo en los resultados del análisis bibliométrico.

En lo que respecta a la interpretación de los resultados obtenidos, todos ellos tienen toda una lógica y sencilla explicación si se les contextualiza en el área de conocimiento y lugar de generación; y por comparación con un análisis bibliométrico general realizado para la producción científica global sobre análisis del riesgo de inundación (Díez-Herrero y Garrote, 2020).

En primer lugar, la evolución temporal de incremento exponencial de publicaciones sobre inundaciones es común en diversos campos de la ciencia, y en particular también en los análisis y evaluaciones del riesgo por inundación (Díez-Herrero y Garrote, 2020). Lo que sí que resulta llamativo es la existencia de saltos o escalones significativos en el crecimiento con una periodicidad de unos seis años, y precisamente coincidentes con la aprobación de la Directiva europea de inundaciones 60/2007 y los dos ciclos de estudios y producción cartográfica de desarrollo de la misma. El impulso administrativo, técnico y económico de la puesta en marcha de las evaluaciones preliminares de riesgo (EPRI), los mapas de peligrosidad y riesgo por inundación (MPRI) y los planes de gestión de riesgo de inundación (PGRI) puede haber servido de acicate de la producción científico-técnica en la temática en España. También resulta llamativo el mayor ritmo de crecimiento de los estudios de riesgo de inundación, y no sólo de inundabilidad o peligrosidad, que denota que cada vez se publican más trabajos integrales y completos en nuestro país, con estimación económica o social del riesgo.

Predominan las publicaciones científicas, en inglés, en revistas muy especializadas en aspectos de la peligrosidad (hidrología) o aspectos ambientales (riesgos), promovidas por instituciones y autores del ámbito de los centros de investigación científica básica (CSIC) o facultades universitarias (UB) de titulaciones científicas (Física, Geología, Geografía). Pero cuando se introducen términos de búsqueda más relacionados con aspectos técnicos y de aplicación práctica (como el riesgo, análisis, evaluación y gestión) aparecen otros organismos públicos de investigación sectorial y de asesoramiento técnico (IGME, CEDEX) y las escuelas de ingeniería (Civil, Caminos, Forestal) de universidades politécnicas (UPC, UPV, UPM).

Existe una buena correlación entre la producción científica de publicaciones entre las instituciones y los autores, de forma que las instituciones líderes son los centros de trabajo de los autores que figuran en las primeras posiciones en el ranking; es el caso del CSIC (G. Benito, F.A. Comin) y la UB (M.C. Llasat, M. Barriendos). Pero hay otro tipo de correlaciones complejas, en las que instituciones líderes (como UPC, UPV o UPM), no tienen un único autor en las primeras posiciones del ranking, sino a varios; o al contrario, que autores que lideran el ranking (como R. Batalla, A. Díez-Herrero, P. García-Navarro o J.M. Bodoque), no tienen a sus instituciones en los primeros puestos (ULl, IGME, UZar o UCLM, respectivamente), por falta de masa crítica de más autores para elevar las cifras de la institución en su conjunto. De ello se deduce la necesidad de una mayor y mejor coordinación entre las diferentes instituciones y autores que trabajan en esta temática, para obtener resultados más relevantes a nivel internacional. Cooperación que podría conseguirse, por ejemplo, a través de recientemente creado Grupo de trabajo de I+D+i en inundaciones, coordinado por la Dirección General del Agua.

De cara al futuro es previsible que se produzca una mayor producción bibliográfica en estudios interdisciplinares, que incorporen aspectos de las ciencias sociales y humanidades, en relación por ejemplo con la evaluación de la vulnerabilidad social y económica, el análisis de la percepción del riesgo y los planes y estrategias de comunicación y divulgación del riesgo; como ya viene pasando en la literatura científico-técnica a nivel global (Díez-Herrero y Garrote, 2020). También es previsible que se incorporen con fuerza las publicaciones del ámbito de la gestión, que comenzaron a publicarse con retardo en estas revistas científicas (Fig.2), y que en los próximos años verán incrementados los casos de estudio sobre medidas naturales de retención de agua en el territorio, medidas basadas en la naturaleza e infraestructuras verdes.

Finalmente, una consideración de índole formal: sería conveniente que las instituciones y los autores homogeneizaran sus registros en las bases de datos bibliográficas, para evitar las duplicidades o denominaciones múltiples en los nombres de centros y personas (con asterisco en las Tablas 2 y 3), que producen distorsiones y errores en los análisis bibliométricos como el presente.

5. CONCLUSIONES

La producción científica española sobre inundaciones en el ámbito académico internacional de prestigio ha tenido un fuerte incremento en cantidad y calidad en las últimas décadas. Las categorías generales, áreas de investigación, tipos de publicaciones y títulos son acordes a los del conjunto de la producción científica internacional en este campo. No obstante, muy pocas instituciones, grupos de investigación y autores concentran la mayor parte de las publicaciones, por lo que, a pesar de la atomización de los equipos de investigación, se produce una concentración en determinadas entidades y personas. En el futuro parece que se impondrán los estudios interdisciplinares que combinen aspectos de las ciencias de la naturaleza y las ciencias sociales, enfocadas a las medidas de mitigación no estructurales.

AGRADECIMIENTOS

Estos estudios forman parte de las tareas de difusión de la estrategia de comunicación (GT5.T3) del proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE).

REFERENCIAS

- Clarivate Analytics (2020a). Available online: https://clarivate.com/news/acquisition-thomson-reuters-intellectual-property-science-business-onex-baring-asia-completed/ (accessed on 21 03 2020).
- Clarivate Analytics (2020b). Available online: https://clarivate.com/webofsciencegroup/wp-content/uploads/sites/2/2019/08/d6b7faae-3cc2-4186-8985-a6ecc8cce1ee_Crv_WoS_Upsell_Factbook_A4_FA_LR_edits.pdf (accessed on 20 03 2020).
- Díez, A. y Laín, L. (1998). Aportaciones de los estudios del ITGE a la prevención del riesgo de inundaciones en España. En: A. Gómez y F. Salvador (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, 603-612. Universitat de Barcelona y S.E.G., Barcelona.
- Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, Madrid.
- Díez-Herrero, A. and Garrote, J. (2020). Flood risk analysis & assessment, applications and uncertainties: a bibliometric review. *Water*, 2020, 12(7).
- Montalbán, F., Manzano, A., Correa, L., Cabot, J. y Godé, L. X. (2003). *Recomanacions tècniques per alsestudis d´inundabilitat d´àmbit local*. Agència Catalana de l´Aigua,
- Llorente, M., Diez, A. y Lain, L. (2006). La experiencia del IGME en cartografía de peligrosidad de avenidas torrenciales e inundaciones: de Casiano de Prado a PRIGEO. En: A. Díez, L. Lain y M.
- Llorente (Eds.), *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*, 41-63. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, Madrid.
- Olcina Cantos, J. y Díez-Herrero, A. (2016). Cartografía de inundaciones en España. *Estudios Geográficos*, LXXVIII, 282, 283-315. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201710.
- Sánchez, F. J. y Lastra, J. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid.


Excmo. Ayuntamiento de Orihuela


DIPUTACIÓN
DE ALICANTE
CICLO HÍDRICO


Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante


INSTITUTO UNIVERSITARIO DEL AGUA
Y DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES


Cátedra del
Agua
DIPUTACIÓN DE ALICANTE
UNIVERSIDAD DE ALICANTE


CAMPUSHABITAT5U


HiDRAQUA


iambiente