

# INUNDACIONES Y CAMBIO CLIMÁTICO

Estudios y experiencias a nivel europeo en el  
primer ciclo de la Directiva de Inundaciones



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

**Coordinadores**

Francisco Javier Sánchez Martínez<sup>1</sup>  
Mónica Aparicio Martín<sup>1</sup>

**Elaboración y redacción**

Gerardo Benito Ferrández<sup>2</sup>  
María José Gomes Machado<sup>2</sup>  
Carlos Garijo Sarria<sup>3</sup>  
Daniel Martín Anta<sup>3</sup>  
Ana Salgado Cámara<sup>3</sup>  
María Tourné Whyte<sup>3</sup>

**Colaboración y asesoría externa**

Félix Francés García<sup>5</sup>  
José Manuel Gutiérrez<sup>4</sup>  
José Ángel Aranda Domingo<sup>5</sup>  
Maialen Iturbide<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dirección General del Agua, Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico

<sup>2</sup> CSIC. Museo Nacional de Ciencias Naturales

<sup>3</sup> TRAGSATEC, Grupo TRAGSA

<sup>4</sup> Grupo de Meteorología de Santander. Instituto de Física de Cantabria CSIC-UC

<sup>5</sup> Instituto Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València

**A efectos bibliográficos la obra debe citarse como sigue:**

*Inundaciones y cambio climático* (2018). Ministerio para la Transición Ecológica.  
Madrid. 105 pp.



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

**Edita:**

© Ministerio para la Transición Ecológica  
Secretaría General Técnica  
Centro de Publicaciones

**Diseño y maquetación:**

TRAGSATEC. Grupo TRAGSA

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

NIPO: 638-18-031-8





# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1. Contexto	7
1.2. Contenido del documento	8
1.3. Consideraciones iniciales sobre cambio climático	8
<b>2. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA EXISTENTE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>11</b>
2.1. Documentación revisada	11
2.2. Análisis de los cambios climáticos e hidrológicos observados	12
2.2.1. Evidencias de cambios observados a escala global y de Europa	12
2.2.2. Evidencias de cambios observados en España	15
2.3. Proyecciones futuras según modelos de cambio climático e hidrológico	25
2.3.1. Proyecciones futuras a escala global y de Europa	25
2.3.2. Proyecciones futuras para España	29
2.4. Vulnerabilidad, exposición e impactos socio económicos	37
2.4.1. Cambios observados en daños e impactos	37
2.4.2. Cambios proyectados en daños e impactos	40
2.5. Principales opciones de adaptación	41
2.5.1. Medidas para reducir los riesgos de inundación	42
2.5.2. Medidas para el control del flujo de inundación	42
2.5.3. Medidas para reducir el daño en las llanuras de inundación	42
2.5.4. Medidas de evacuación y guía	42
2.5.5. Adaptación económica y del sector del aseguramiento	43
2.6. Conclusiones sobre la revisión técnica sobre cambio climático	43
2.6.1. Conclusiones sobre las observaciones (registros pasados)	43
2.6.2. Conclusiones sobre las proyecciones (modelización futura)	43
<b>3. REVISIÓN DE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO POR PARTE DE EUROPA</b>	<b>45</b>
3.1. Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático	45
3.2. Principales líneas metodológicas seguidas durante la implementación del primer ciclo de la Directiva de Inundaciones por los países participantes en el Grupo Europeo de Inundaciones	46
3.3. Resultado de la implementación de la Directiva de Inundaciones en los países participantes en el Grupo Europeo de Inundaciones	50
3.4. Principales líneas metodológicas de inclusión del cambio climático en el segundo ciclo de implantación de la Directiva de Inundaciones	59
3.4.1. Comentarios adicionales	65
3.5. Conclusiones de la adaptación al cambio climático por parte de Europa	65
3.5.1. Cambio climático e inundaciones durante el primer ciclo de la Directiva	65
3.5.2. Cambio climático e inundaciones durante el segundo ciclo de la Directiva	65
3.5.3. Temas importantes para abordar/consensuar durante el segundo ciclo de la Directiva	65

3.5.4.	Investigación pendiente de desarrollar.....	66
3.5.5.	Cooperación transfronteriza .....	66
3.5.6.	Retos del cambio climático para la gestión del riesgo de inundación .....	66
3.5.7.	Efectos del cambio climático en los patrones de inundación.....	66
<b>4.</b>	<b>PRIMERA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA LA CONSIDERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO DE INUNDACIÓN EN ESPAÑA, DURANTE EL SEGUNDO CICLO DE LA DIRECTIVA DE INUNDACIONES .....</b>	<b>67</b>
4.1.	Breve descripción de la metodología aplicada.....	68
4.1.1.	Modelo climático .....	69
4.1.2.	Modelo meteorológico.....	70
4.1.3.	Modelo hidrológico.....	71
4.1.4.	Modelo hidráulico.....	71
4.2.	Conclusiones obtenidas tras la aplicación de la metodología piloto en España.....	71
4.2.1.	Conclusiones sobre la metodología aplicada .....	71
4.2.2.	Conclusiones sobre los resultados obtenidos .....	73
4.2.3.	Caudales y zonas inundables.....	75
<b>5.</b>	<b>RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EPRI.....</b>	<b>77</b>
	<b>ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS .....</b>	<b>79</b>
	Índice de Tablas.....	79
	Índice de Figuras .....	80
	<b>ANEJO 1.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
	Referencias bibliográficas referentes a la revisión técnica sobre cambio climático.....	83
	Referencias bibliográficas de la revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa .....	88
	Referencias bibliográficas de la aproximación metodológica desarrollada por España para la evaluación de la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación.....	89
	<b>ANEJO 2.- PROYECCIONES DE RCMS DEL PROYECTO EURO-CORDEX DISPONIBLE EN LA WEB DE AEMET PARA LAS DISTINTAS DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEJO 3.- GRÁFICOS DE EVOLUCIÓN DEL CAMBIO EN LAS PRECIPITACIONES INTENSAS PARA LAS DISTINTAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS (REGIONALIZACIÓN AR5-IPCC) .....</b>	<b>97</b>



## 1

# Introducción

## 1. Introducción

### 1.1. Contexto

La Directiva de Inundaciones (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”, traspuesta al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio), tiene como objetivo principal reducir las consecuencias de las inundaciones.

De acuerdo con los plazos establecidos en la Directiva de Inundaciones, se han determinado las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) para cada Demarcación Hidrográfica, dentro de la Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI); y de las que se han elaborado los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación, y los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs). Este proceso ha sido completado por todas las Confederaciones Hidrográficas, quedando sólo por aprobar el PGRI de Canarias.

Dentro de las actuaciones incluidas en el “Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España” (“Plan PIMA Adapta”), en materia de gestión del agua y del dominio público hidráulico (“Plan PIMA Adapta Agua”) para el año 2016 se encuentra la implantación de dichos PGRIs, en materias coordinadas

con la adaptación al cambio climático; estableciendo las metodologías, herramientas y análisis necesarios.

La aprobación por el Gobierno de estos Planes de Gestión, implica la adopción y ejecución (de acuerdo con cada Administración competente) de una serie de medidas escogidas específicamente de entre un programa general, para cada una de las ARPSIs estudiadas según sus características de peligrosidad y riesgo. Este programa general de medidas, según el artículo 11.5 del RD 903/2010, se encuentra orientado a lograr los objetivos de gestión del riesgo de inundación para cada zona identificada en la EPRI de cada Demarcación.

Una de estas medidas, en concreto la 13.04.01, implica 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.”.

Específicamente, esta medida contempla la mejora de la evaluación de los efectos de cambio climático sobre las inundaciones, la cual deberá hacerse conjuntamente con la Oficina Española de Cambio climático y satisfará, además, uno de los requerimientos exigidos por la Comisión Europea en la Directiva de Inundaciones, donde se recoge en el artículo 14 del capítulo VIII, que “las posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de inundaciones se tomarán en consideración en las revisiones indicadas en los apartados 1 y 3”.

Es decir, que el estudio de la influencia del cambio climático debe incluirse en la revisión de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación y de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación que se llevará a cabo antes de finales de 2018 y de 2021, respectivamente.

### 1.2. Contenido del documento

Con este objetivo, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de los estudios realizados sobre este tema a nivel global y europeo, cuyas conclusiones se incluyen en el apartado sobre la “Revisión de la documentación técnica existente sobre cambio climático”, apartado 2 de este documento.

También se ha analizado cómo se ha incorporado el cambio climático en los trabajos de implantación de la Directiva de Inundaciones durante su primer ciclo en distintos países europeos, los que conforman el Grupo Español de Inundaciones. Todo ello puede consultarse en el apartado 3, “Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa”.

Finalmente, se incluye una propuesta metodológica para la consideración del cambio climático en el riesgo de inundación, que se ha desarrollado en España durante el año 2017 en el marco del Plan PIMA Adapta. Se encuentra en el punto 4, “Primera aproximación metodológica para la consideración del cambio climático en el riesgo de inundación en España, durante el segundo ciclo de la Directiva de Inundaciones”.

Aparte de las hipótesis y consideraciones de partida, en consonancia con el resto de trabajos europeos, se incluyen las principales conclusiones obtenidas, las cuales pueden servir de punto de partida para la incorporación del cambio climático en la EPRI.

### 1.3. Consideraciones iniciales sobre cambio climático

De acuerdo a los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos recogidos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014), el último publicado hasta la fecha por el Grupo Intergubernamental sobre cambio climático, éste producirá cambios en los patrones de inundación (Jiménez-Cisneros et al., 2014), por lo que resulta importante tener acceso a la información sobre su posible influencia y sus potenciales consecuencias, así como gestionar los riesgos que se puedan derivar (Döll et al., 2015).

Por lo tanto, el cambio climático es un tema que requiere de nuevos conocimientos y estudios, tanto de posibles impactos como de estrategias de adaptación que mitiguen sus efectos.

En la actualidad, existe una gran incertidumbre sobre las proyecciones más adecuadas para estimar los cambios en los eventos de precipitación extrema, lo que ha dificultado la implementación de la Directiva de Inundaciones.

Durante su primer ciclo de aplicación, el último informe del IPCC publicado era el Cuarto Informe (AR4, Fourth Assessment Report, del año 2007), por lo que los países que hubieran considerado el cambio climático debieron basarse en los escenarios de emisión de este trabajo.

Este informe considera distintos escenarios de emisión, también llamados SRES (Nakicenovic et al., 2000), que se encuentran agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 B2). Estos escenarios exploran las distintas vías de desarrollo alternativas que podrían acontecer hasta el año 2100, incorporando efectos de la evolución demográfica, económica, tecnológica y ambiental, junto con las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) resultantes.

**Tabla 1.- Las cuatro familias de escenarios de emisiones del cuarto informe del IPCC en relación al calentamiento global proyectado para el 2100 (Fuente IPCC, 2007)**

FOURTH ASSESSMENT REPORT, AR <sub>4</sub>	ENFOQUE MÁS ECONÓMICO	ENFOQUE MÁS AMBIENTAL
Globalización (mundo homogéneo)	A1 Crecimiento económico rápido (grupos: A1T; A1B; A1FI) 1.4 - 6.4 °C	B1 Sostenibilidad del medio ambiente mundial 1.1 - 2.9 °C
Regionalización (mundo heterogéneo)	A2 Orientación regional desarrollo económico 2.0 - 5.4 °C	B2 Sostenibilidad del medio ambiente local 1.4 - 3.8 °C



Las familias A1 y A2 se centran más en factores económicos que las familias B1 y B2, que prestan más interés a factores ambientales (**Tabla 1**). Las familias A1 y B1 se basan en un mundo con una economía y desarrollo de carácter globales (mayor eficiencia energética, disminución de la población desde mitad del S.XXI), mientras que las líneas evolutivas de las familias A2 y B2 consideran que la economía presentará un carácter regional (mayor autosuficiencia, tecnología fragmentada).

En la mayor parte de los estudios previos sobre inundaciones y cambio climático (antes de la publicación del Quinto Informe del IPCC) se seleccionaban por defecto tres escenarios: B1, A1B y A2, que son considerados como los escenarios de baja, media y alta emisión de gases de efecto invernadero, respectivamente.

Con la publicación del Quinto Informe del IPCC (2013), los escenarios de emisión se han visto modificados, por lo que los cálculos que se hagan con posterioridad deben tomar las nuevas hipótesis como datos de partida. Es decir, que en el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones, el estudio de los posibles impactos del cambio climático en el riesgo de inundación debe adaptarse a los nuevos escenarios de emisión propuestos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

En este informe se desarrollan nuevas hipótesis de evolución de emisiones, renombrando las anteriores

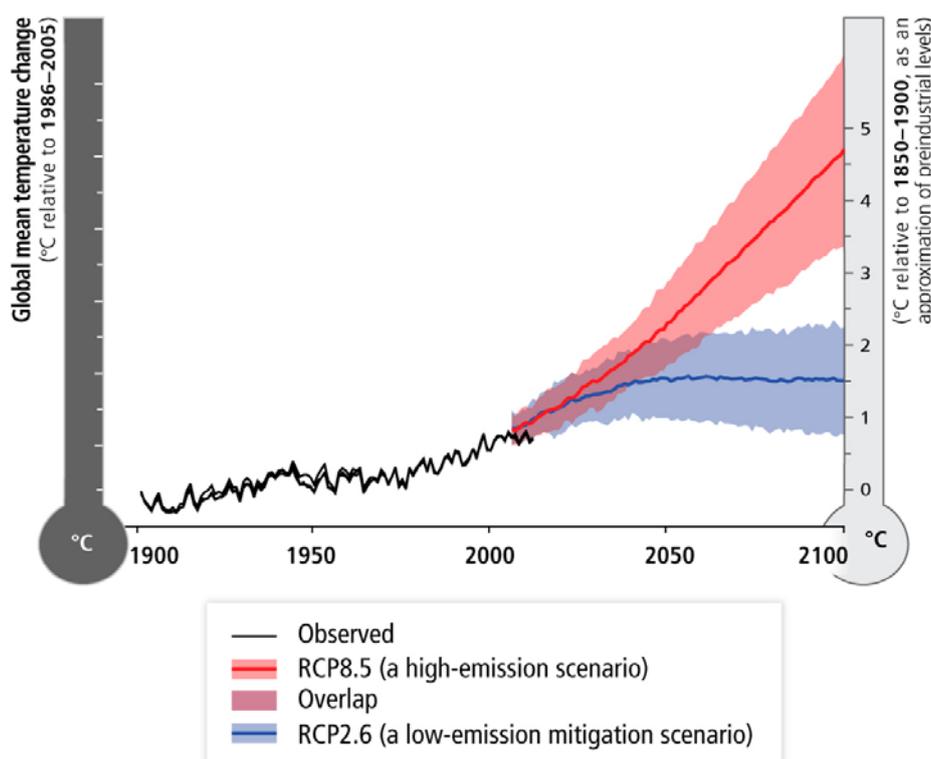
familias en los denominados RCPs (Representative Concentration Pathways o Trayectorias de Concentración Representativas). Es decir, que a partir de la publicación del Quinto Informe se abandona la consideración de los escenarios de emisiones A1, A2, B1 y B2 para empezar a utilizar los RCP.

A partir de estas nuevas hipótesis de emisiones de cambio climático se han generado nuevos datos, que son el resultado del trabajo realizado por el proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), con el objetivo de coordinar distintos modelos climáticos.

Los RCPs representan el forzamiento radiativo total calculado para el año 2100, utilizando el periodo 1986-2005 como elemento de control, para simular el comportamiento del clima en el futuro.

Según se desprende de la siguiente imagen (**Figura 1**), la consideración del escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP 2.6 implicaría un forzamiento radiativo de  $2.6 \text{ W/m}^2$ . Este escenario en concreto representa una hipótesis en el que las emisiones aumentan hasta el año 2050 y posteriormente descienden hasta 2100 (mitigación de las emisiones). Se trataría del escenario con menores implicaciones de cambio, ya que a pesar del aumento del forzamiento radiativo del planeta, éste no es muy elevado.

**Figura 1** - Escenarios de emisión mínimo (RCP 2.6) y máximo (RCP 8.5) y su equivalente en subida de temperatura media hasta 2100 (Fuente IPCC, 2014)



En el lado opuesto se encontraría el RCP 8.5, en el que las emisiones no dejan de aumentar y donde se favorecería que el clima planetario sufriera grandes cambios en su funcionamiento.

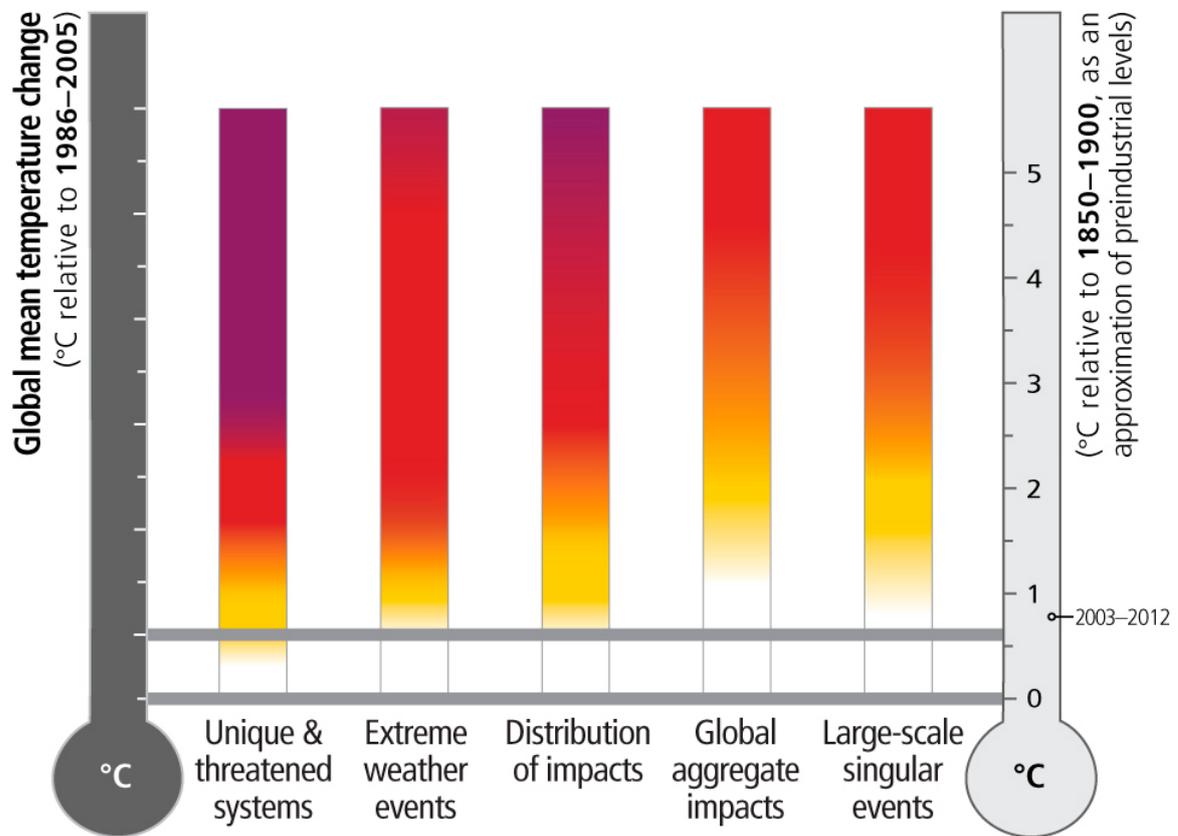
Por último, en un término medio, se encontrarían los forzamientos de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero RCP 4.5 y RCP 6.0, los cuales son escenarios tendentes a la estabilización.

Como ejemplo, en la **Figura 2**, se muestra el nivel de riesgo asociado al cambio climático de algunos de los sistemas, eventos o impactos de la dinámica terrestre.

Estos nuevos escenarios de emisiones (RCPs) permiten avanzar en el análisis del impacto del clima en los sistemas naturales (entre ellos, las inundaciones) y, en consecuencia, en el conocimiento de las medidas de mitigación a considerar en la Directiva de inundaciones.

Igualmente, las revisiones de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo que se efectúan periódicamente permitirán incorporar los resultados que surjan de nuevos desarrollos metodológicos.

**Figura 2.-** Escenarios de emisión mínimo (RCP 2.6) y máximo (RCP 8.5) y su equivalente en subida de temperatura media hasta 2100 (Fuente IPCC, 2014)



### Level of additional risk due to climate change

Undetectable

Moderate

High

Very high

## 2

## Revisión de la documentación técnica existente sobre cambio climático

### 2. Revisión de la documentación técnica existente sobre cambio climático

#### 2.1. Documentación revisada

El presente informe ha revisado la información publicada en diferentes trabajos internacionales sobre los efectos del cambio climático en las inundaciones. En concreto, los realizados por los siguientes organismos o grupos de trabajo:

- **IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change** (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). Órgano internacional para la evaluación del cambio climático adscrito a la ONU. En concreto, se ha consultado el Quinto Informe de valoración sobre el cambio climático.
- **JRC, Joint Research Centre**. El Centro Común de investigación de la Comisión Europea para apoyo de sus políticas.
- **Grupo EXCIMAP**, European Exchange Circle on Flood Mapping. Grupo europeo para el intercambio de información sobre metodologías de realización de mapas de inundación.
- **CE, Comisión Europea**. Órgano ejecutivo y de iniciativa legislativa sobre el Parlamento europeo. En concreto la Guía para la Gestión de las Cuencas Fluviales bajo el Cambio climático (Guidance Document nº24 “River Basin Management in a Changing Climate”).
- **AEMET, Agencia Estatal de Meteorología**. Facilita información climática general sobre valores extremos y proyecciones de cambio climático bajo diferentes escenarios de emisión, entre otros servicios.
- **CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas**. Proporciona apoyo técnico en distintas áreas de conocimiento relacionadas con el cambio climático.
- **OECC, Oficina Española de Cambio Climático**. Centro asociado a la Secretaría de Estado de Medio Ambiente

del Ministerio para la Transición Ecológica de España para desarrollar políticas relacionadas con el cambio climático. En concreto el proyecto ECCE, para la evaluación de los Efectos del Cambio Climático en España.

- **IAHR, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research.** Grupo Internacional de Investigaciones Hidro-Climáticas, con varias revistas de investigación.

El número de informes procedentes de organismos internacionales que disponen de referencias para España es reducido, mientras que los informes realizados por organismos europeos presentan mayor precisión y nivel de detalle en sus trabajos. Sin embargo, rara vez llegan al detalle de Demarcación Hidrográfica, es decir, rara vez tienen un detalle suficiente como para obtener conclusiones adecuadas.

En la mayoría de estos informes, el análisis de los patrones de cambio en las inundaciones presenta un esquema similar, describiendo los cambios observados, proyecciones, impactos en los riesgos por inundación y medidas encaminadas a la mitigación y adaptación al cambio.

Este mismo esquema se seguirá a lo largo del presente informe, distinguiendo a su vez los cambios observados y proyectados tanto en precipitaciones (enfocado en precipitaciones extremas y en máximas diarias) como en caudales (enfocado en caudales máximos) de ríos.

## 2.2. Análisis de los cambios climáticos e hidrológicos observados

### 2.2.1. Evidencias de cambios observados a escala global y de Europa

Es un hecho que los desastres y daños causados por las inundaciones en todo el mundo han aumentado desde 1970, pero ¿hasta qué punto este aumento es una consecuencia del Cambio Climático antropogénico?

En el Informe Especial sobre la Gestión de Riesgos de Eventos Extremos y Desastres para Mejorar la Adaptación al Cambio climático, del IPCC (Informe SREX), Seneviratne et al. (2012) determinaron que no es posible asegurar una relación entre los cambios detectados en los patrones de las avenidas (cambios en la frecuencia y magnitud) y el cambio climático antropogénico (provocado por el ser humano), debido a la limitada evidencia en los registros de medición.

Coincidiendo con este análisis, el informe del IPCC (2014) concluye que no existen evidencias calibradas que permitan determinar una tendencia de cambio generalizada durante las últimas décadas que relacione los cam-

bios en la magnitud y frecuencia de las inundaciones con el clima.

La tendencia creciente en los daños por inundación que se está viendo por todo Europa podría ser explicada como el resultado del incremento en la exposición de personas y activos (Handmer et al., 2012), al ocupar cada vez más las zonas próximas a los cursos fluviales, en vez de un cambio real en el clima.

La falta de pruebas inequívocas sobre las tendencias de las inundaciones causadas por el clima se debe principalmente a (Kundzewicz et al., 2014):

- La escasez de registros a largo plazo (series de más de 50 años) en las estaciones de aforo en régimen de flujo natural o casi natural (la mayoría situadas en las cabeceras de cuenca).
- Las perturbaciones en cuencas fluviales con registros a largo plazo debidas a perturbaciones humanas.
- La existencia de una gran dificultad a la hora de distinguir y diferenciar entre los posibles cambios en el régimen de inundaciones como consecuencia de variaciones en el clima y la propia variabilidad interna natural del clima y de la hidrología.

*En verdad siempre ha habido cambio climático en nuestro planeta como consecuencia de factores ajenos al ser humano.*

*El cambio climático de carácter antropogénico es consecuencia de las actividades del ser humano, como por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por industrias, etc.*

Aunque no sea posible establecer de forma veraz la correlación entre los cambios en el clima y en el régimen de inundaciones, tanto los resultados del IPCC (Jiménez Cisneros et al., 2014) como los del informe SREX (Seneviratne et al., 2012), sí describen una influencia detectable en varios componentes del ciclo del agua, como son la precipitación y la fusión de nieve. Como consecuencia de la variación en estos parámetros (aumento en los valores de precipitación y del deshielo de las cuencas con régimen nival), el resultado podría implicar una tendencia creciente en la magnitud de inundaciones en algunas regiones.

Para estudiar estos cambios en el tiempo y el espacio, el IAHR (2015) recomienda que los organismos públicos

que traten con este tipo de estudios investiguen sobre:

- Entender y cuantificar las tendencias a corto y largo plazo de las variables hidro-climáticas, como la precipitación o el caudal.
- De las variables hidro-climáticas, evaluar la ocurrencia, variabilidad y cambios repentinos en el tiempo de los eventos extremos.
- Entender los cambios en estas tendencias y atribuirlos o no a la variabilidad natural o a los factores antropogénicos.

### CONCLUSIÓN: EVIDENCIAS Y PROBLEMAS

*Hasta el momento no es posible demostrar con fiabilidad un cambio en el régimen de inundaciones (magnitud y frecuencia) atribuible como causa directa del cambio climático. ¿por qué? Las inundaciones extraordinarias tienen una frecuencia decadal o multidecadal y demostrar un cambio estadísticamente significativo requiere de registros largos de caudales de avenidas (superior a 50-75 años).*

*Son necesarios más estudios sobre la tendencia de las inundaciones a lo largo del tiempo, así como estudios sobre la variabilidad natural del clima, para poder afirmar que el cambio climático está realmente afectando a la peligrosidad de las inundaciones.*

La recopilación de los estudios realizados a nivel internacional y nacional, que se presenta en este informe tratará de satisfacer estas recomendaciones.

#### ◆ Cambios en las precipitaciones

En relación a los eventos de precipitación extrema (precipitaciones con muy baja probabilidad de ocurrencia), hay numerosos estudios e información que muestran la existencia de un cambio, sobre todo creciente, desde finales del siglo XX, aunque estos cambios tienen fuertes variaciones regionales y subregionales (Seneviratne et al., 2012).

Por ejemplo, en Europa, durante el siglo pasado, se han encontrado tanto tendencias crecientes en las precipitaciones extremas de invierno en muchas regiones, como en Inglaterra (Maraun et al., 2008; Zolina et al., 2008) así como decrecientes en otras, como el norte de

Italia (Pavan et al., 2008), Polonia (Łupikasza et al., 2011), y algunas áreas costeras del Mediterráneo (Toreti et al., 2010). La tendencia en el caso de los extremos de precipitación en verano ha sido débil o no espacialmente coherente (Costa et al., 2012; Durão et al., 2010; Kyselý, 2009; Maraun et al., 2008; Moberg et al., 2006; Pavan et al., 2008; Rodda et al., 2010; Zolina et al., 2008). Hay que destacar que las incertidumbres son mayores en el sur de Europa y el Mediterráneo, debido a la fuerte variabilidad natural que existe en estas regiones. Por lo tanto, las tendencias registradas en estas zonas tienen baja confianza, es decir, no son claras.

*Una mala planificación del desarrollo urbano suele aumentar el riesgo y las consecuencias asociadas a inundaciones, debido a la vulnerabilidad de los bienes expuestos y de la población.*

*El clima no es el principal causante del aumento global de los daños debidos a las inundaciones.*

Además de los cambios correspondientes a los extremos de precipitación, se han revisado otros documentos que estudian las posibles variaciones de las precipitaciones máximas (precipitación poco probable - una vez al año), ya que estos eventos también pueden tener consecuencias para la población u otros elementos sensibles. Para este tipo de precipitación intensa, los resultados de los estudios proyectan también un aumento de la frecuencia y la intensidad en gran parte de Europa, lo que puede implicar un aumento de la probabilidad de las inundaciones repentinas (Dankers y Feyen, 2008), que por otro lado son las más perjudiciales en términos económicos y de impactos humanos (EEA, 2017).

El impacto de estos eventos es mayor en áreas urbanizadas y en cuencas fluviales modificadas por cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal (Benito et al., 2010; Robson et al., 1998), así como después de un incendio forestal como consecuencia de la hidrofobia del suelo y la repelencia al agua de algunos componentes orgánicos quemados.

En este sentido, son particularmente vulnerables los nuevos enclaves de desarrollo urbano y las instalaciones turísticas, como las zonas de acampada y recreación (tal y como sucedió durante la inundación de Biescas en 1997, que afectó al camping de las Nieves; Benito et al., 1998). Aparte de las nuevas zonas de desarrollo urbano, las infraestructuras lineales, como carreteras, ferrocarriles y canales con drenaje inadecuado, son especialmente susceptibles a sufrir daños por inundaciones (Arkell y Darch, 2006).

**CONCLUSIÓN: CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN**

*Se ha constatado un aumento de las precipitaciones extremas en la mayor parte de Europa, especialmente en invierno y en el norte del continente.*

*En el sur de Europa, en la región mediterránea, estas tendencias no son tan claras debido a la fuerte variabilidad de su clima.*

### ◆ Cambios en los caudales

Las inundaciones más comunes en Europa son causadas por:

- Precipitación copiosa y persistente (normalmente masas de aire atlánticas) que afectan a sectores extensos de las cuencas fluviales.
- Precipitación intensa en cuencas pequeñas que genera crecidas repentinas (crecidas súbitas, relámpago o flash floods).
- Precipitación intensa “in situ” sobre zonas deprimidas con escaso drenaje y sectores urbanos (inundaciones pluviales).
- Deshielo rápido debido al aumento de la temperatura diurna o por precipitación caída sobre zonas con acumulaciones importantes de nieve.

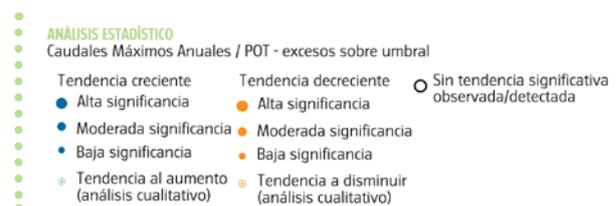
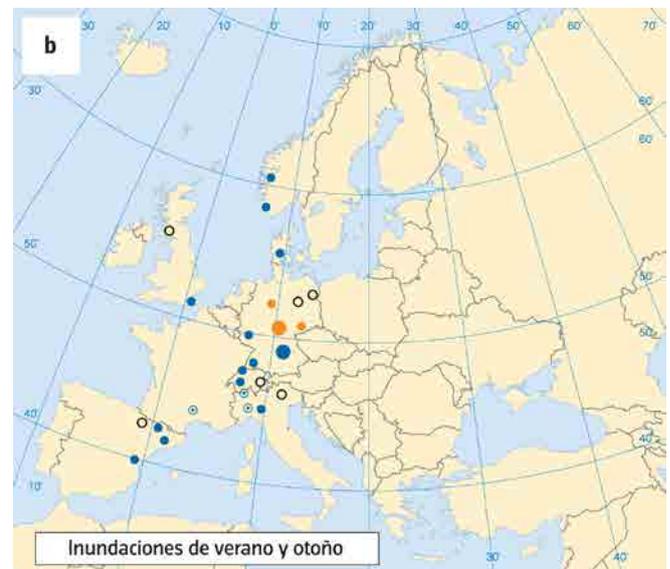
Sin embargo, analizar estos eventos por separado es difícil ya que frecuentemente se suelen dar combinaciones de ellos. Por ello, un estudio por áreas de interés puede ser más apropiado.

En la **Figura 3** se muestra un resumen de las tendencias en la incidencia de inundaciones encontradas en la revisión realizada, a nivel europeo, a lo largo del año. Se ha dividido el análisis en dos periodos estacionales: invierno y primavera (a) y verano y otoño (b).

Se puede apreciar que, en las zonas oeste, sur y central de Europa (y principalmente en Alemania), los análisis de los registros de valores de eventos de avenida muestran tendencias significativas al alza durante el período 1951-2002 (Petrow y Merz, 2009). Esta tendencia concuerda con las tendencias crecientes observadas en caudales anuales e invernales que, desde 1984, se registran en el río Meuse (Noroeste de Alemania, Holanda y Bélgica) y sus afluentes (excepto el río Geul).

Por el contrario, en el este y noreste de Alemania y en la República Checa (ríos Elba y Oder), se ha observado una ligera disminución de las inundaciones invernales y no se han detectado cambios en el flujo máximo de verano (Mudelsee et al., 2003; De Roo et al., 2003).

**Figura 3-** Tendencias de los eventos de inundación en diferentes países europeos para los meses de invierno y primavera (a) y verano y otoño (b), basados en análisis estadísticos de las series de caudal además de descripciones cualitativas de registros históricos y de paleocrecidas





En Francia, no hay evidencia sobre ninguna tendencia generalizada en los caudales máximos anuales, aunque un análisis regional muestra una tendencia a la disminución de la frecuencia de inundaciones en los Pirineos, y una disminución de la magnitud de las inundaciones en la región de los Alpes y en la región noreste de Francia (Renard et al., 2008).

Por último, los registros de inundaciones en las cuencas hidrográficas en el Reino Unido mostraron tendencias positivas significativas en los indicadores de caudales máximos, principalmente en las cuencas hidrográficas de influencia marina en el norte y oeste del Reino Unido (Hannaforde y Marsh, 2008) aunque en estudios previos esos cambios no fueron tan obvios (Robson et al., 1998).

### CONCLUSIÓN: INUNDACIONES EN EUROPA

*Se puede apreciar un aumento de las inundaciones (en magnitud o intensidad) en el norte de Europa. Así en Alemania y Reino Unido, hay una tendencia positiva en la incidencia de inundaciones de invierno.*

*Por otro lado, en el sur, en Francia y en los Alpes, se observa una disminución de las inundaciones en invierno, aunque un aumento significativo en verano.*

#### ◆ Consideraciones sobre otras variables relacionadas

Otra variable interesante a estudiar son los deslizamientos de tierra como consecuencia de precipitaciones intensas.

En el sur de Europa, las reforestaciones realizadas desde inicios del siglo XX han aumentado la cohesión y la estabilidad de las pendientes, de acuerdo con un mayor conocimiento y prevención de los deslizamientos de las laderas (Clarke y Rendell, 2006; Corominas, 2005), por lo que la probabilidad de ocurrencia de estos eventos ha descendido. Por otro lado, en zonas montañosas Schmidt y Dehn (2003) observaron un aumento en la frecuencia de los deslizamientos de tierra. La reactivación de grandes movimientos suele ocurrir en áreas con flujo de agua subterránea y erosión lateral de los cauces fluviales sobre las laderas.

Sin embargo, los registros observados no muestran tendencias significativas durante las últimas décadas

tanto en el número de deslizamientos como en los impactos de los mismos (Hilker et al., 2009).

Esta ausencia de tendencias y de datos concluyentes puede ser debida a la falta general de series largas de registros de deslizamientos de tierra, incluso en regiones con bases de datos razonablemente bien establecidas (como Suiza).

*Un aumento de las precipitaciones puede provocar consecuencias, a priori, difíciles de prever.*

*Por ejemplo, al aumentar el contenido de agua en el suelo (llegando incluso a la saturación), éste es más propenso a moverse debido a la falta de cohesión interna.*

*Por lo tanto, un aumento de las precipitaciones conlleva un aumento de la probabilidad de que ocurran deslizamientos de tierra.*

#### 2.2.2. Evidencias de cambios observados en España

##### ◆ Cambios en las precipitaciones

La valoración de los cambios en las precipitaciones que generan inundaciones en España se ha realizado en base a la revisión de documentos y artículos científicos que analizan las precipitaciones máximas, así como las tendencias en precipitaciones medias.

A este respecto, Valdes-Abellan et al. (2017) han observado que la precipitación media anual para un periodo analizado de 31 años ha disminuido en hasta un 15% en las últimas tres décadas en algunas regiones mediterráneas (ej. Alicante). También, el número de días con lluvia superior a 1 mm ha disminuido ligeramente, es decir, hay menos días con lluvia perceptible. Sin embargo, las reducciones de los valores de precipitación han sido mucho más importantes para lluvias con volúmenes mayores. Por ejemplo, en el caso de lluvias por encima de los 40 mm, la reducción ha sido de entre un 15 y un 40% en diferentes estaciones de la región de Murcia y de un 40% en Alicante.

En base a estos resultados se podría concluir que cuanto mayor sea el volumen de lluvia considerado (es decir, lluvias máximas y extremas), mayor será la reducción. Sin embargo, estas reducciones no implican forzosamente un cambio de clima regional (a un clima más árido), ya que las mayores reducciones las sufren estaciones con precipitaciones medias altas (para esa zona del Levante). Los autores también destacan que, esta disminución de la precipitación media,

ha implicado que la probabilidad de ocurrencia de los eventos de precipitación extrema haya disminuido (Valdes-Abellan et al., 2017).

Estos resultados están de acuerdo sólo en parte con los descritos en el informe del IPCC (IPCC, 2014) ya que el clima de esta zona, del sureste español, es más árido que en el resto de la Península Ibérica. Los cambios en los valores medios así como en la frecuencia de los eventos de precipitación extrema, resultado del estudio anterior, no serían extrapolables al resto de la Península.

### CONCLUSIÓN: PRECIPITACIÓN MEDIA EN ESPAÑA

*Varios estudios han observado un descenso de la precipitación media en España en la mayor parte del año. Este descenso es especialmente claro en las regiones del sureste (Murcia y Alicante) en los meses de invierno, primavera y verano.*

Analizando la variabilidad estacional de las precipitaciones, Río et al. (2011) muestran que las lluvias durante el período 1961-2006 tendieron a disminuir en invierno, primavera y verano en más del 70% de las 553 estaciones meteorológicas analizadas por toda España. Sin embargo, en otoño (meses de septiembre, octubre y noviembre) hubo un aumento de la lluvia media en más del 65% de las estaciones.

Respecto a las precipitaciones máximas y extremas, varios estudios han tratado de caracterizarlas, tanto a nivel local como a nivel nacional.

Estos procedimientos sirven para calcular la precipitación máxima para diferentes probabilidades de ocurrencia, también entendidos como periodos de retorno.

El objetivo de este tipo de enfoque busca determinar las precipitaciones máximas y extremas (las que son poco o muy poco probables) mediante una función de distribución de probabilidad y así poder calcular precipitaciones extremas que no se hayan registrado hasta el momento. Esta técnica es utilizada, sobre todo, por ingenieros civiles para, por ejemplo, el diseño de redes de alcantarillado en las ciudades o estimar los parámetros de seguridad en las presas.

Así, se pueden encontrar los artículos de García et al. (2007) que tratan de ajustar una función de distribución tipo GEV (Valores Extremos Generalizados) a los valores de precipitación máxima diaria, o Rodrigo (2010) y

Rodrigo y Trigo (2007) que utilizan una distribución tipo Gamma.

Acero et al. (2011) estudiaron las precipitaciones máximas diarias en 52 estaciones meteorológicas (con datos entre 1958 y 2004) mediante un análisis de valores sobre el umbral (método que utiliza todos los valores - precipitaciones en este caso - por encima de un umbral determinado). Analizando como los valores superan, o no, el umbral a lo largo del intervalo de tiempo estudiado para un periodo de retorno de 20 años (**Figura 4**), se observa un aumento de la magnitud de las precipitaciones máximas especialmente marcada en otoño e invierno en la zona cercana a Valencia, en la franja sureste mediterránea y en el sur de Portugal, y una disminución en las precipitaciones extremas de invierno y primavera en el sur de España cerca del estrecho de Gibraltar (Acero et al., 2011).

*Un periodo de retorno es aquel que marca la probabilidad media de ocurrencia de un evento.*

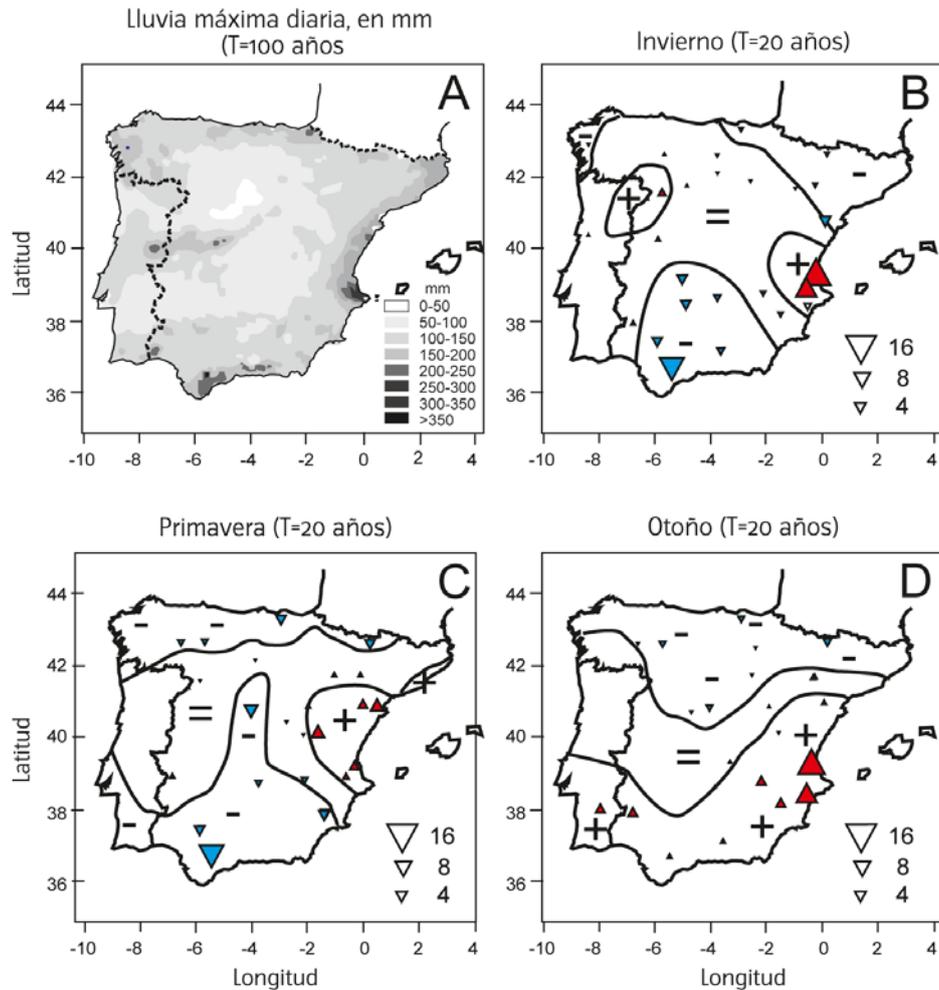
*Para su comprensión se suele indicar en años, siendo un periodo de retorno de 100 años (media de 1 vez en 100 años) aquel con una probabilidad de ocurrencia anual de 0.01%.*

Esta tendencia negativa de precipitaciones máximas en el suroeste de la Península es consistente con una fase positiva predominante de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO en sus siglas en inglés) en los últimos 30 años (Rodrigo y Trigo, 2007). La NAO es un índice climático que determina, en función de presiones atmosféricas, la predisposición a sufrir precipitaciones procedentes del Atlántico. En este caso, al ser positiva, indica que hay una zona de altas presiones muy importante en el Atlántico, lo que impide que lleguen frentes de lluvia a la Península.

*La Oscilación del Atlántico Norte es un índice climático.*

*Este índice está relacionado con el 'anticiclón de las Azores', y tiene dos 'fases' o posiciones: Positiva (sin lluvia en España) y Negativa (con lluvia abundante en el Oeste peninsular).*

**Figura 4.** - A.- Distribución de la precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 100 años (MIMAM, 2000 y Brandão et al., 2001). B, C, D: Distribución espacial de las tendencias (+; positiva; -; negativa; = falta de tendencia) en el periodo de retorno de 20 años de precipitación máxima estacional (mm década<sup>-1</sup>) durante el período de 1958 a 2004. Los triángulos ascendentes y descendentes indican tendencias positivas y negativas respectivamente (según Acero et al., 2011). Modificada de Benito y Machado (2012)



### CONCLUSIÓN: PRECIPITACIONES MÁXIMAS Y EXTREMAS EN ESPAÑA

*A pesar de las incertidumbres asociadas al estudio de precipitaciones máximas, algunas conclusiones tienen una base amplia. Éste es el caso las precipitaciones extremas (de un periodo de retorno de 20 años) donde se observa un aumento en su magnitud en el Levante español en la mayor parte del año, y un descenso de las mismas en el sur de la Península Ibérica. Estudios con series más largas permitirían eliminar gran parte de esta incertidumbre asociada.*

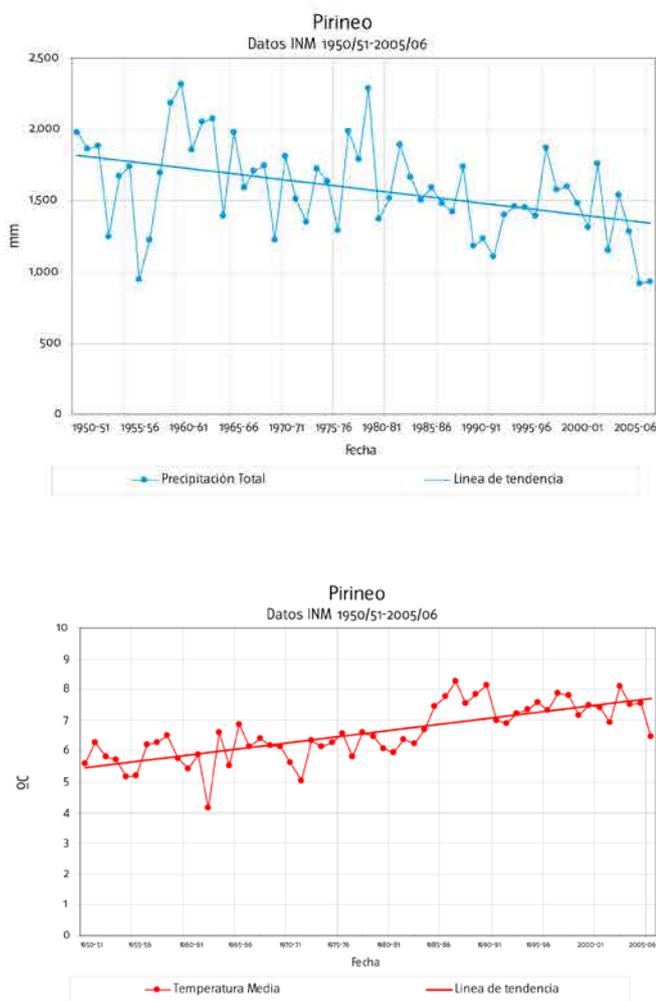
No obstante, según Valdes-Abellan et al. (2017) no se puede concluir que estas tendencias observadas continuarán en el futuro, aunque en caso de que así fuera esto nos conduciría a un escenario alarmante que se debería considerar en la planificación de los recursos hídricos en el sector mediterráneo.

#### ◆ Cambios en la nieve

La Dirección General del Agua y los Organismos de Cuenca, en particular la Confederación Hidrográfica del Ebro, conscientes de la importancia de un mejor conocimiento de los procesos nivales y la monitorización de sus cambios en España, iniciaron el programa ERHIN (Evaluación de los Recursos Hídricos procedentes de la Innivación) que se ha venido potenciando y desarrollando desde 1984. Los datos de la red ERHIN se obtienen de mediciones nivales (pértigas y telenivómetros) y de la aplicación de modelos hidrológicos en el Cantábrico, Pirineo, Sierra Nevada y Sistema Central.

En estas zonas montañosas, el aumento de la temperatura ha provocado una disminución en la acumulación de nieve en sectores de altura media y alta, lo que a menudo se ha visto amplificado por las tendencias negativas en la precipitación invernal (ERHIN, 2008; 2011; **Figura 5**).

**Figura 5.** - Precipitaciones anuales en la zona ERHIN del Pirineo para el periodo hidrológico 1950/51-2005/06. Temperaturas medias anuales en la zona ERHIN del Pirineo para el periodo hidrológico 1950/51-2005/06. Según ERHIN, 2008.



En los últimos años se ha detectado un adelanto del deshielo de la nieve y una disminución en los picos de primavera, con efectos tanto en la duración del período de déficit hídrico como en el régimen de inundaciones (López-Moreno y García-Ruiz, 2004).

Los Pirineos son un ejemplo sobresaliente del cambio climático y ambiental (abandono del suelo), que afectan a los recursos hídricos y al régimen de inundaciones por deshielo en las montañas de España (López-Moreno et al., 2014).

En las últimas cinco décadas, la temperatura ha aumentado entre 1 y 2 °C (**Figura 5**) y la precipitación invernal ha disminuido alrededor del 10%, provocando una disminución en la acumulación de nieve en invierno y primavera (López-Moreno et al., 2011). En algunos años con acumulaciones de nieve superior a la media; (e.g. 2003, 2005, 2007; **Figura 6**), la fusión se produce muy rápidamente, adelantándose en, al menos, un mes el aporte de caudales a los cursos fluviales respecto a la situación habitual (ERHIN, 2008).

Los episodios de lluvia caída sobre acumulaciones importantes de nieve pueden generar picos de inundación en algunas Demarcaciones Hidrográficas, como el Duero o el Ebro. Por ejemplo, en el río Ebro las crecidas de febrero de 2003, marzo-abril de 2007, febrero-marzo de 2015 y abril de 2017 estuvieron ocasionadas por precipitaciones prolongadas durante semanas (de nieve en zonas altas), que continuaron con fases de advección cálida que resultaron en una importante fusión nival que se sumó a la escorrentía generada por las lluvias (Ollero 2004; Sánchez-Fabre, 2015; Espejo 2008).

Durante la inundación del 2003 en el Ebro, el hidrograma de crecida se incrementa notablemente al recibir los aportes del Arga y el Aragón, que presentan una importante aporte por fusión de nieve (**Figura 7**).

El aumento de la temperatura media en las zonas de montaña de España (**Figura 5**) ha contribuido directamente al aumento del número de inundaciones en el Ebro en el siglo XXI, aunque ninguna de ellas ha superado los límites definidos para las crecidas con periodo de retorno de 10 años (Sánchez Fabre et al., 2015).

Las inundaciones generadas por lluvias sobre nieve en zonas de montaña no han sido suficientemente estudiadas en España, pero en otras zonas (por ejemplo los Alpes), este tipo de episodios han aumentado entre el 40% en elevaciones bajas, y un 200% en las altitudes más altas (Beniston y Stoffen, 2016).

Aunque afortunadamente no todos los episodios de inundación con influencia de deshielo rápido desencadenan inundaciones extremas, el riesgo de una descarga catastrófica obviamente aumenta en función del número de tales eventos. Es esperable que el riesgo de inundaciones relacionadas con episodios de fusión de nieve aumente durante las primeras décadas de calentamiento global, antes de que comiencen a disminuir durante la segunda mitad del siglo XXI. Las recientes inundaciones han demostrado claramente que el daño en infraestructuras y agricultura son altos, y su mitigación sólo se puede acometer con una toma de decisiones temprana en base a modelos hidrológicos predictivos.

Figura 6. - Evolución del volumen de agua acumulado en forma de nieve (VAFN) en la cuenca del Ebro para las cuencas del Pirineo modelizadas por ERHIN para el periodo hidrológico 2002/03-2006/07. ERHIN, 2008

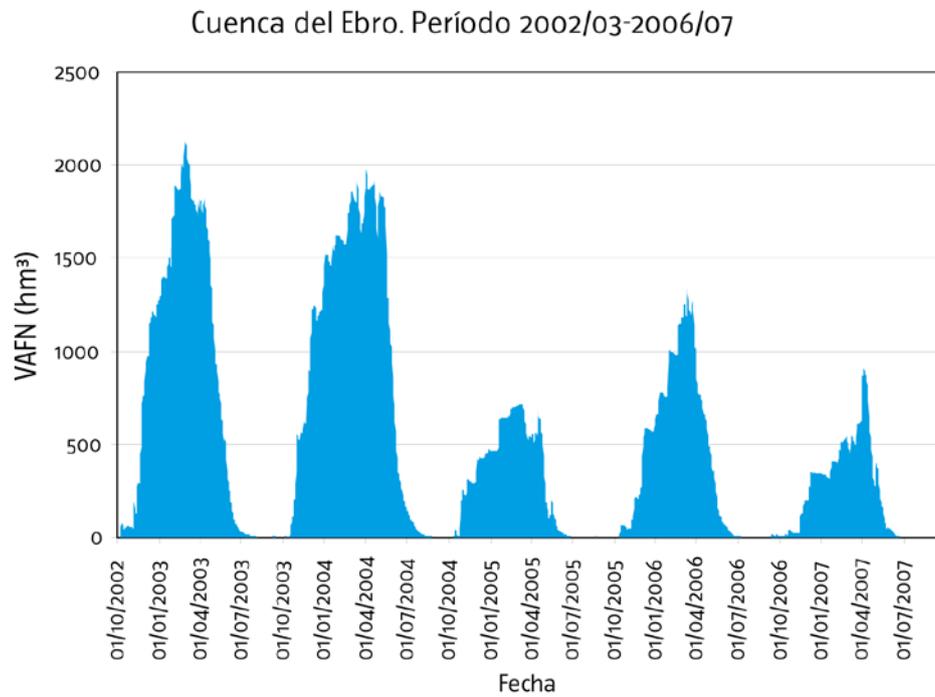
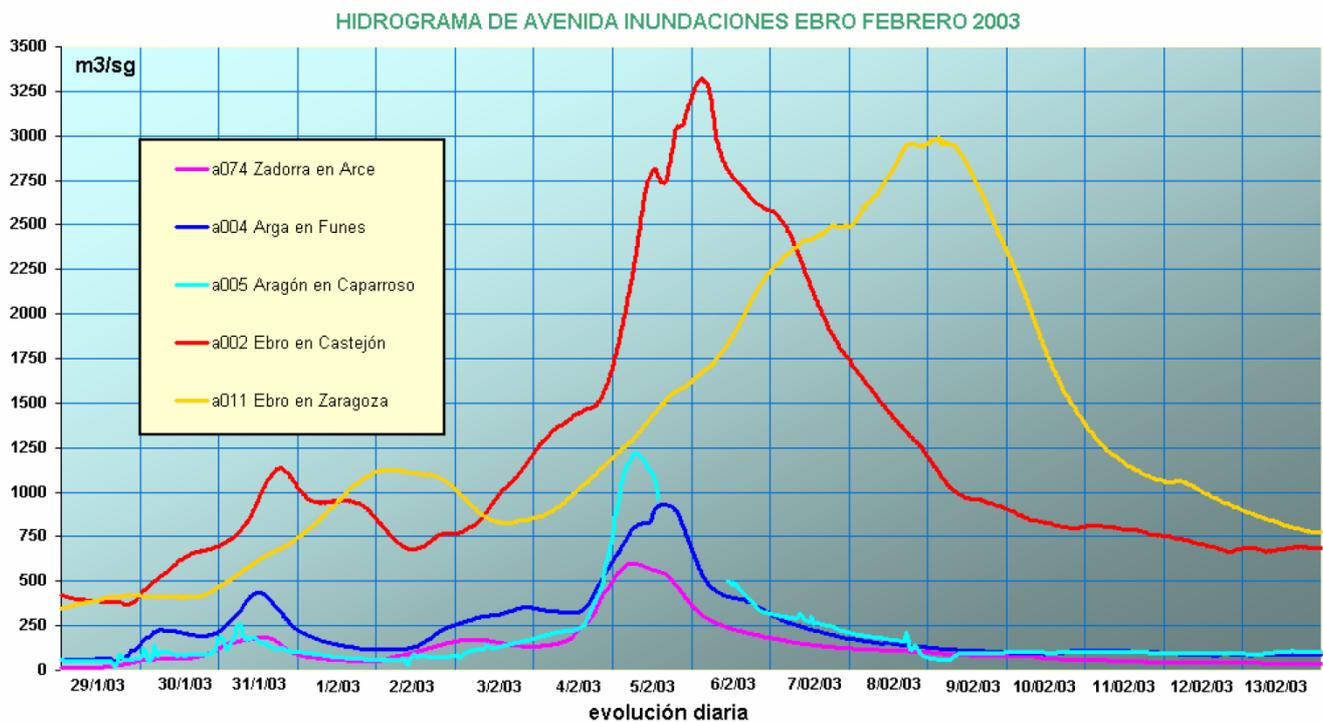


Figura 7. - Hidrograma de avenida de las inundaciones del Ebro en febrero de 2003. Caudales quinceminutales registrados por el Servicio Automático de Información Hidrológica (SAIH). Según Galván et al., 2004.



### ◆ Cambios en los caudales

En la Península Ibérica, entre los estudios sobre análisis de tendencias en series de caudales destacan los realizados por Beguería et al. (2003) en la zona de los Pirineos, y Morán-Tejeda et al. (2011) en la región del Duero. De forma más generalizada, Lorenzo-Lacruz et al. (2012) evaluaron la presencia de tendencias en series de volúmenes de escorrentía anual y estacional en cuencas distribuidas a lo largo de la Península Ibérica.

En estos tres estudios se detecta la presencia de patrones generalizados de tendencias negativas en la frecuencia de inundaciones. En sus resultados, se sugiere que la influencia de cambios de origen climático y el alto grado de regulación que experimentan las cuencas, son los principales factores que pueden explicar las tendencias detectadas.

Respecto a los caudales máximos (los que pueden provocar inundaciones), Silva et al. (2012) evaluaron la hipótesis de estacionariedad en las series de máximos anuales en 10 cuencas de Portugal, donde los eventos fueron seleccionados con el método de valores sobre umbral (en este caso al ser valores máximos - picos sobre umbral o POT según sus siglas en inglés). En su trabajo, demostraron mediante tests estadísticos, que la tasa de ocurrencia de caudales máximos constituye un proceso no homogéneo de Poisson, lo cual indica, en otras palabras, que no existe una estacionariedad en la tasa de ocurrencia. Es decir, que la ocurrencia de eventos extremos (caudales máximos en este caso) no es constante en el tiempo.

*Habitualmente, para estudiar las inundaciones máximas, se suelen utilizar los valores máximos ocurridos en un año.*

*Sin embargo, este método puede dejar sin contabilizar numerosos eventos a lo largo de un año que son más grandes que, por ejemplo, el evento del año siguiente.*

*Para solventar este problema, se utiliza el método de "picos sobre umbral" (POT en inglés) que tiene en cuenta todos los eventos por encima de un umbral determinado.*

En sus resultados también sugieren que los cambios experimentados en la tasa de ocurrencia de crecidas en las cuencas de estudio, podrían encontrarse estrechamente vinculados a los cambios que experimenta la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), de la cual ya se ha hablado en el punto anterior. Esta aseveración indicaría

que la ocurrencia de eventos extremos de caudales de las cuencas estudiadas en Portugal, tendría una relación directa con un índice climático.

La influencia de la variabilidad decadal en el índice NAO sobre las inundaciones queda igualmente patente en las cuencas españolas de la vertiente Atlántica, en particular Duero, Tajo y Guadalquivir. En estas cuencas, la generación de crecidas y la duración y magnitud de las mismas, se encuentran estrechamente ligadas a los cambios en la precipitación invernal.

En España, el análisis de las series de caudales máximos anuales observados en estaciones de aforo apunta a una disminución en los picos de las crecidas ordinarias en los últimos 40 años (López de la Cruz, 2013; Mediero et al. 2014). En parte, esta disminución de los caudales pico se debe a la construcción de presas, la mayor parte correspondientes a la década de los años 50 y 60. Actualmente, el número de presas en España supera el millar (1133 incluyendo diques laterales), con una capacidad de embalse superior a 56.000 hm<sup>3</sup>. Sin embargo, este efecto laminador de los embalses se muestra insuficiente en el caso de crecidas extraordinarias, como las registradas en cuencas mediterráneas, en 1982 y 1987, o en cuencas atlánticas en el año 1979. Como se puede observar en la **Figura 8**, estas crecidas presentaron los mayores caudales punta del registro sistemático de aforos (últimos 50 años).

De este modo, el análisis de las series de caudales máximos anuales registrados cuencas del Guadalquivir y del Guadiana, muestra una tendencia decreciente en la magnitud y frecuencia de las inundaciones, mientras que en las cuencas del Atlántico central y septentrional (Tajo y Duero) no se observa tendencia significativa en la frecuencia y magnitud de grandes inundaciones (Benito et al., 2005b). En las cuencas mediterráneas, las relaciones entre la precipitación y las crecidas no responden a ningún patrón concreto, y por tanto la relación clima-crecidas resulta difícil de concretar.

De cualquier manera, en todas las cuencas resulta evidente que se incorpora una variabilidad en los caudales máximos debido al efecto de las infraestructuras hidráulicas que dificulta el análisis hidro-climático de las series de caudal. En algunos casos, se han restituido las series de caudales máximos a régimen natural, para eliminar el ruido introducido por los embalses, aunque los trabajos de este tipo en España resultan escasos. Por tanto, se debe tener cierta precaución a la hora de interpretar la tendencia de los caudales de crecida registrados en los últimos 30 años en ríos regulados en relación con los efectos del cambio climático.

Los estudios de tendencias y rupturas en las series de caudales máximos se implementan sobre cursos en régimen natural, o poco regulados, en su mayoría localizados en la cabecera de las grandes cuencas fluviales o en ríos cuencas pequeñas o medianas. López de la Cruz

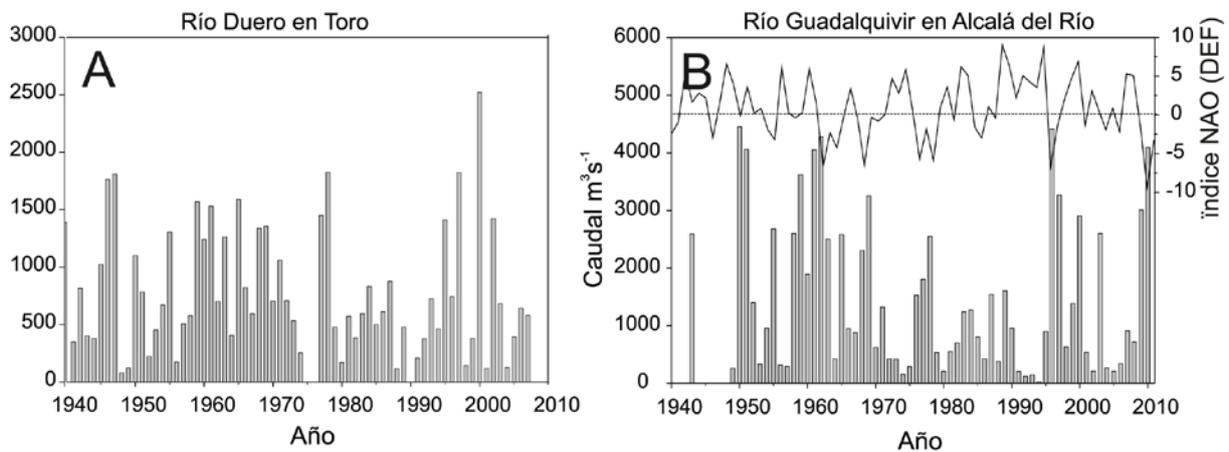


(2013), trata de detectar la no estacionariedad en las series de caudales máximos anuales en la España Peninsular. Este enfoque está encaminado hacia la identificación de cambios y tendencias temporales, y su análisis en modelos estadísticos no estacionarios adaptables a las condiciones de cambio climático (López y Francés, 2013; Machado et al., 2015). En su análisis de tendencias en caudales máximos anuales en 85 estaciones de aforo con régimen natural o poco alterado, identifica rupturas en la media de los caudales máximos en el 55% de las

estaciones, de las cuales un 88% experimentan una disminución en la media, posterior al punto de ruptura.

Estos puntos de ruptura son cambios bruscos en la tendencia de las series, es decir, escalones que provocan que si antes la línea que representaba la media estaba a una altura, tras esta ruptura la línea que representa la media esté a una altura diferente (bien debajo o por encima de la anterior). Los puntos de ruptura encontrados se presentan en su mayoría durante el periodo de los años 60 a los 90, siendo más significativos durante la década de 1970.

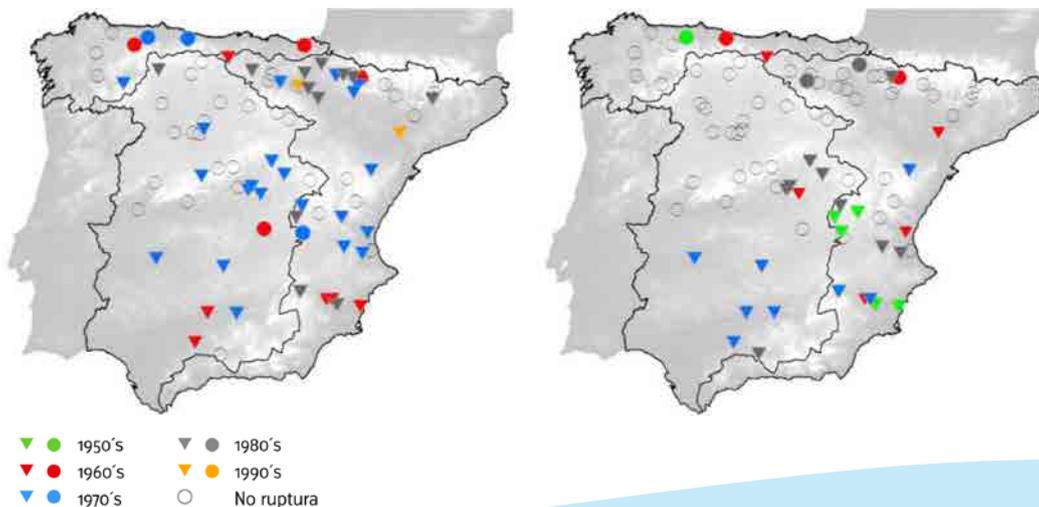
**Figura 8.** - Caudales máximos anuales registrados en los ríos Duero (arriba) y Guadalquivir (abajo). En la figura inferior se muestra la relación entre los mayores caudales pico y valores negativos del índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO) registrado durante los meses de invierno (Diciembre-Enero-Febrero (DJF)). Figura modificada de Benito y Machado (2012)



Además, el análisis realizado de forma similar en la varianza de las series, muestra que el 37% de las series de caudales máximos presentan cambios, de los cuales el 90% experimentan disminuciones en el estadístico durante el periodo de los años 50 a los años 90.

Al analizar los puntos de ruptura tanto en la media como en la varianza de las series de caudales máximos anuales, resulta evidente un patrón generalizado en el que los estadísticos analizados tienden a disminuir después del punto de ruptura. Otro punto a destacar es que el 60% de las series que experimentan ruptura en la media, experimentan también ruptura en la varianza.

**Figura 9.** - Mapas con la distribución espacial de las series de caudales máximos con puntos de ruptura en la media (derecha) y varianza (izquierda). Los triángulos indican decremento en la media o varianza después del punto de ruptura, mientras los círculos indican incremento (López de la Cruz, 2013)



Estos resultados están de acuerdo con los cambios observados en series largas de caudales máximos anuales, detectados por Mediero et al. (2014), que interpretan que la disminución en la media de los caudales máximos es a consecuencia de un aumento de la evapotranspiración de las cuencas.

La distribución espacial de las estaciones con puntos de ruptura en la media muestra un patrón generalizado de rupturas en las regiones central, norte y mediterránea (**Figura 9**). Como ya se ha comentado, López de la Cruz (2013) explica que en las regiones central y mediterránea, la media sufre una tendencia descendente tras los puntos de ruptura, y que dichas rupturas están con-

centradas en las estaciones de aforo localizadas en las Demarcaciones Hidrográficas del Tajo, Guadiana y Júcar en los años 70, mientras que en las Demarcaciones del Ebro, Guadalquivir y Segura aparecen en el periodo de los años 60 a los 90.

En la región norte, por el contrario, la media aumenta posteriormente a las rupturas en la Demarcación del Cantábrico, mientras que en el Miño-Sil se aprecia ausencia de rupturas o disminuciones en la media. Las tendencias, junto con su asociación a la situación del río (régimen alterado, poco alterado o natural), se pueden observar más detenidamente en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.- Número de estaciones con puntos de ruptura en la media y en la varianza, y signo de la tendencia posterior al punto de ruptura**

RÉGIMEN DE LA CUENCA	MEDIA		VARIANZA	
	Incremento	Decremento	Incremento	Decremento
Natural	3	11	2	7
Poco alterado	3	15	2	15
Muy alterado	3	18	9	7

En lo que respecta a la distribución espacial de las series con rupturas en la varianza, se observa que las rupturas se limitan a estaciones de las cuencas del Guadiana, Guadalquivir y Tajo en la región central durante los años 70 y 80, y estaciones de las Demarcaciones del Júcar y Segura en la región mediterránea durante el periodo de los años 50 a los 80. Al igual que lo observado en el comportamiento de la media, se aprecia en la varianza una tendencia decreciente en los valores posteriores a los puntos de ruptura en las series de caudales máximos anuales.

En un reciente estudio a escala europea, Blöschl et al. (2017) identifican cambios en la generación de los picos de inundación, que atribuyen a los efectos del cambio climático. En la Península Ibérica, los cambios más significativos se localizan a lo largo de la costa atlántica del norte de Portugal y noroeste de España, donde el 50% de las estaciones muestran un adelanto temporal de las inundaciones, de al menos 15 días cada 50 años (25% de las estaciones con adelanto de más de 36 días cada 50 años). En algunas partes de la costa mediterránea (costa adriática noreste; noreste de España), se observa un retraso de las inundaciones (más de 5 días cada 50 años en el 50% de las estaciones).

### CONCLUSIÓN: CAMBIOS EN LAS INUNDACIONES EN ESPAÑA

*Varios autores han constatado una falta de estacionariedad (falta de continuidad en el tiempo) en las series de caudales de inundación en España. En concreto, mediante un análisis sobre puntos de ruptura en las series, hasta un 55% de las estaciones estudiadas muestran un cambio en la media, junto con una disminución de los valores en los años posteriores.*

*A pesar de la influencia del clima en las inundaciones, otros factores como la regulación de los ríos con embalses o la reforestación podrían explicar los cambios en la media y la varianza.*

*Se ha constatado un adelanto temporal de las inundaciones en el noroeste de España de al menos 15 días cada 50 años, mientras que en noreste de España se registra un retraso de 5 días cada 50 años.*

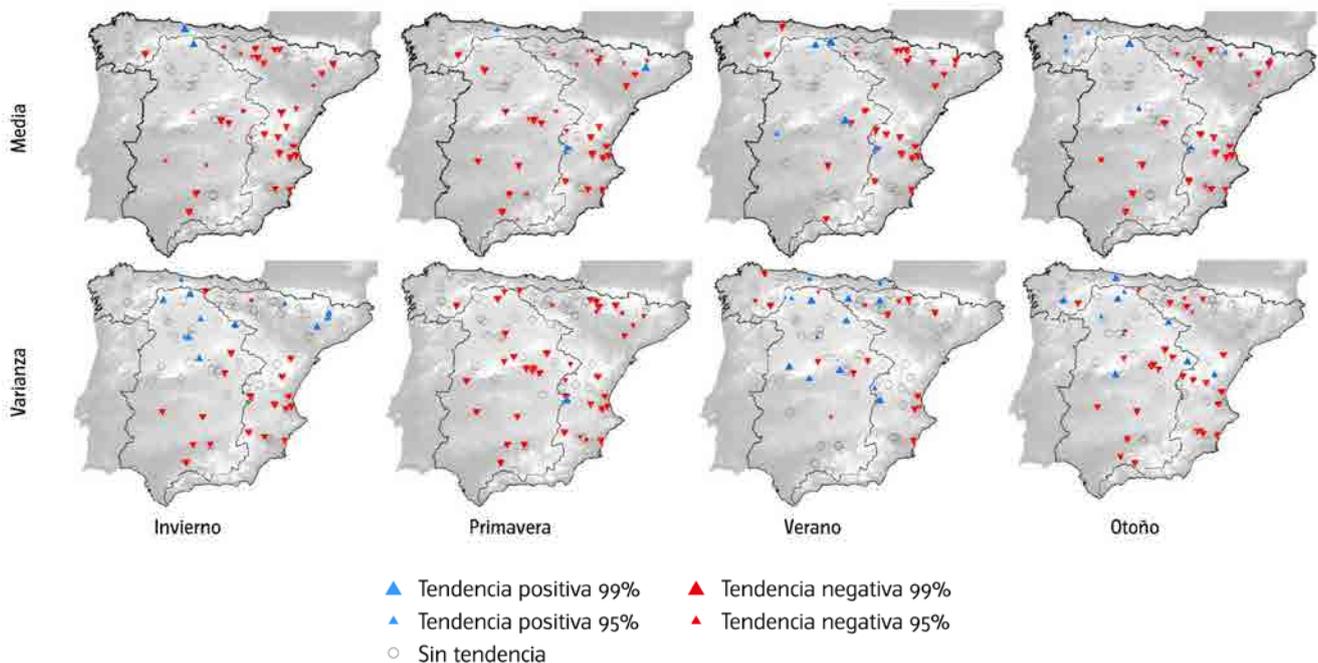
### ◆ Cambios en los caudales estacionales

Además de los caudales máximos anuales, también se analiza el comportamiento de estos máximos en las diferentes estaciones del año. Según López de la Cruz (2013), como podemos observar en la **Figura 10**, el análisis de los puntos de ruptura en la media de los caudales máximos estacionales muestra que, en invierno, un alto porcentaje (más del 50%) de las series experimentan rupturas. El patrón generalizado después de la ruptura en la media en las crecidas invernales muestra una tendencia a disminuir y se observa en estaciones de aforo tanto en régimen natural como poco alterado o muy alterado. En primavera se observan rupturas en la media en un 52% de las series, con un evidente patrón de tendencia a disminuir el estadístico después del punto de ruptura. Estos resultados son coherentes con los descritos por Mediero et al. (2014), que muestran una disminución en los caudales máximos en invierno y primavera, particularmente en el periodo 1959-2009, con excepción del centro-norte peninsular, donde existe una tendencia a aumentar en invierno.

Con respecto a los resultados en verano, se puede apreciar al igual que en los periodos de invierno y primavera, que las series muestran en un alto porcentaje de rupturas (más del 50%) en la media, con tendencia claramente a disminuir en series bajo régimen natural (López de la Cruz, 2013; Mediero et al. 2014). En otoño, aproximadamente el 50% de las series de caudales máximos muestra una ruptura, aunque la tendencia posterior muestra que el 78% de las series presentan disminuciones en la media, mientras que solamente el 22% incrementos (López de la Cruz, 2013). En especial, el patrón decreciente de los máximos de otoño se localizan en el Levante (Mediero et al., 2014).

En resumen, la distribución espacial de las rupturas muestra que, en estaciones de aforo de la región central de la Península, éstas se concentran de manera importante durante los periodos de invierno y primavera, con la evidente disminución en la media posterior al punto de ruptura. Por su parte, en otoño existe una presencia significativa de rupturas en la media de las series de las crecidas estacionales en las estaciones localizadas en la región mediterránea.

**Figura 10** .- Distribución espacial de las series de caudales máximos estacionales con tendencias temporales en la media (panel superior) y varianza (panel inferior) detectados con el test de Mann-Kendall. Los triángulos rojos indican tendencia negativa, mientras que los círculos azules tendencia positiva (López de la Cruz, 2013)



Resultan destacables las persistentes rupturas, mostradas en la **Figura 10**, en series de las Demarcaciones del Júcar y Segura, en el sureste de la Península Ibérica, así como en estaciones ubicadas en la parte alta de la Demarcación del Ebro. En lo que respecta a los caudales máximos estacionales en el norte de la Península, se puede observar que en esta región se presenta el menor número de rupturas en la media, donde es de destacar la presencia de incrementos en la media en

series localizadas en el Cantábrico, mientras que se observan disminuciones en las series de la Demarcación del Miño-Sil.

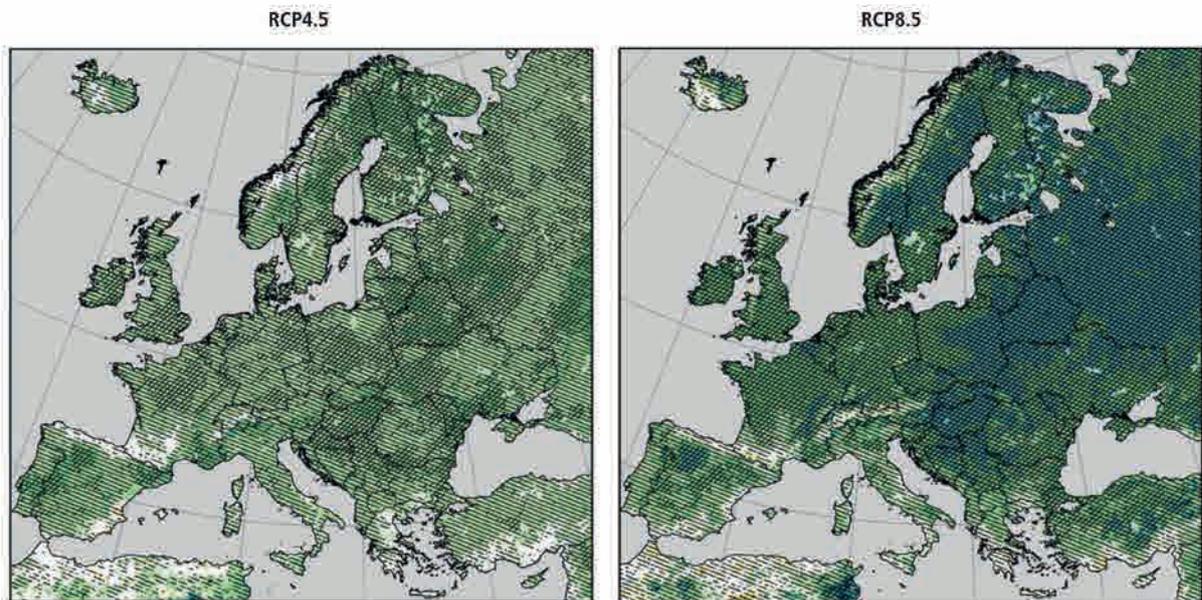
Estos resultados sugieren una posible influencia de los factores antropogénicos y climáticos sobre la evolución del régimen de crecidas. En particular, es evidente el impacto provocado por los embalses (cambio antropogénico) alterando el régimen de crecidas en los ríos, y

provocando estos puntos de ruptura que condicionan el caudal del río aguas abajo de la presa, tanto en los caudales medios (por su regulación) como en los caudales máximos (por la laminación que hacen de las inundaciones). En el caso de las cuencas con régimen natural o poco alterado, la tendencia decreciente en

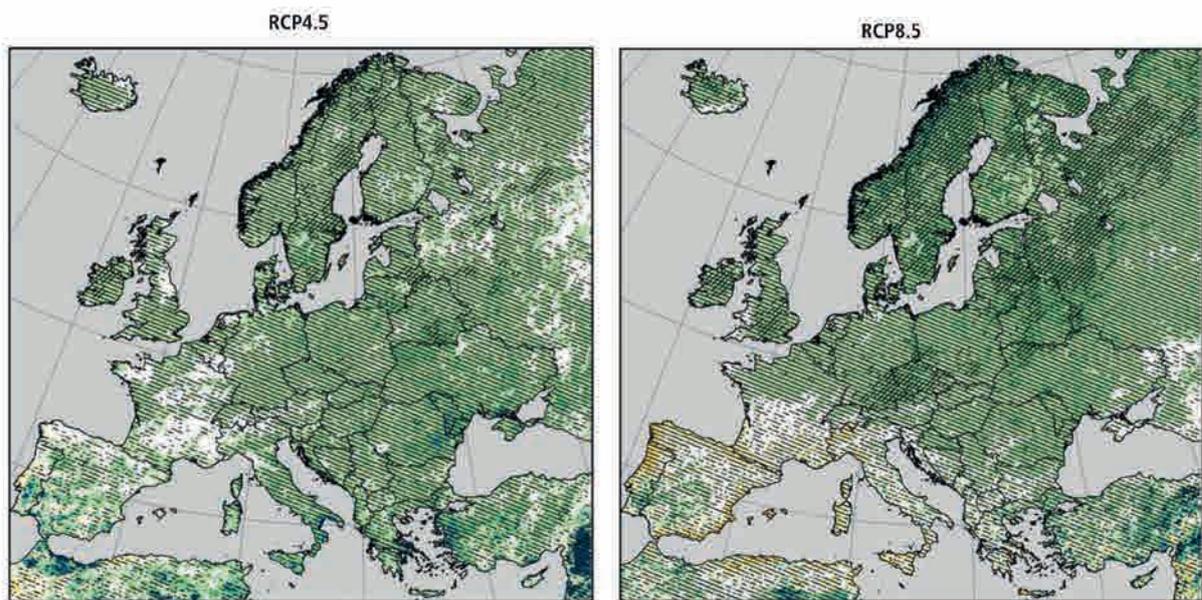
la frecuencia de inundaciones se puede atribuir al aumento en la temperatura (cambio climático) y la evapotranspiración, que reduce el contenido de humedad en el suelo disminuyendo el umbral de escorrentía previo a la inundación (Mediero et al., 2014).

**Figura 11.** - Los cambios estacionales (en %) previstos en la precipitación extrema se definen como el percentil 95 de la precipitación diaria (sólo se consideran días con precipitación > 1 mm/día) para el período 2071-2100 en comparación con 1971-2000. En los meses de diciembre-enero-febrero (DJF; Fig 9.a) y de junio-julio- agosto (JJA; Fig 9.b). Las áreas sombreadas indican que las regiones con un nivel de confianza (al menos el 66% de los modelos coinciden en el signo de cambio) y / o un cambio estadísticamente significativo (significativo a un nivel de confianza del 95% utilizando el test U de Mann-Whitney). Adaptado de Jacob et al. (2014).

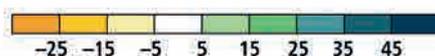
(a) DJF seasonal changes in heavy precipitation (%), 2071–2100 compared to 1971–2000



(b) JJA seasonal changes in heavy precipitation (%), 2071–2100 compared to 1971–2000



Seasonal changes in heavy precipitation in percent



Significant change

Robust change

### 2.3. Proyecciones futuras según modelos de cambio climático e hidrológico

#### 2.3.1. Proyecciones futuras a escala global y de Europa

##### ◆ Proyecciones sobre la precipitación

Según el IPCC (2014), los cambios en la precipitación debidos al cambio climático dependen de la región del mundo que se analice. En Europa, hay una alta confianza en el incremento en la precipitación en el norte de Europa (a lo largo de todo el año) y Europa continental (excepto en verano). Sin embargo, esta proyección no es un patrón común para el resto del continente, presentando una mayor complejidad en el sur de Europa.

Para evaluar los cambios en el clima (o en los caudales) en el futuro, como se ha mencionado, en el Quinto Informe de valoración sobre el cambio climático del IPCC, se ha desarrollado un nuevo enfoque para caracterizar distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (de origen antropogénico - humano). Este enfoque describe cuatro escenarios principales de emisiones, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP en sus siglas en inglés; IPCC, 2014), que se definen según el forzamiento radiativo total del planeta para el año 2100. Los cuatro escenarios, o RCPs, que se han propuesto son: el RCP 2.6, el RCP 4.5, el RCP 6 y el RCP 8.5, siendo este último el peor o más desfavorable.

Para obtener el comportamiento del clima en el futuro, se utilizan modelos climáticos. Los modelos climáticos son representaciones simplificadas del sistema clima terrestre que permiten determinar la evolución en el futuro del clima (Barranco, 2014). Existen Modelos Climáticos Globales (GCMs en sus siglas en inglés) que simulan todo el planeta, y Modelos Climáticos Regionales (RCMs en sus siglas en inglés) que simulan un espacio concreto del planeta, por ejemplo Europa.

A nivel europeo, se han llevado a cabo varios estudios para todo el continente. En la **Figura 11** se muestran los cambios en la precipitación extrema en invierno (Diciembre-Enero-Febrero (DJF); Figura 11a) y verano (Junio-Julio-Agosto (JJA); Figura 11b) proyectados para el periodo 2071-2100 comparados con los registrados en el periodo de control 1971-2000, en los escenarios RCP 4.5 / RCP 8.5 (Jacob et al., 2014). Los cambios representan el cambio medio de las simulaciones de 8 RCMs y el RCP 4.5 (gráfica izquierda) y 9 RCMs y el RCP 8.5 (gráfica derecha). Estos modelos climáticos proceden del proyecto CORDEX y en concreto, del Dominio Europeo (EURO-CORDEX).

En el caso de la Península Ibérica, se observa una tendencia significativa en invierno, con un aumento entre el 5 y el 25% en las zonas baja y media de las cuencas del Duero y Tajo, en el suroeste (cuencas del Tinto y Odiel), así como en el noreste (cuenca del Ebro) de la Península.

Estos cambios son más claros para el RCP 8.5 que para el RCP 4.5.

En los meses de verano los cambios en la precipitación extrema son menores (cambios entre -15 y + 15%) y escasamente significativos, presentándose en el caso del RCP 8.5 una tendencia decreciente en la costa mediterránea y noroeste de la Península (11.b).

Otros posibles aspectos que influyen en la precipitación extrema son los ciclones, es decir, las características de las bajas presiones que originan las lluvias intensas y las tormentas. A este respecto, numerosos estudios (Lekebusch et al., 2006; Lionello et al., 2002; Pinto et al., 2007; Ulbrich et al., 2008) muestran que en el Mediterráneo, disminuirá el número total de ciclones (y por lo tanto la posibilidad de lluvia), pero no hay acuerdo sobre si el número de ciclones severos (los que producen la precipitación extrema) aumentará o disminuirá (Lionello et al., 2002; Pinto et al., 2007).

#### CONCLUSIÓN: PRECIPITACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO

*Las proyecciones para España procedentes de informes europeos muestran aumentos en la precipitación extrema de invierno (de entre un 5 y un 25%), siendo significativos en sectores de la Demarcación del Duero, oeste de la cuenca del Tajo, y en la vertiente pirenaica de la demarcación del Ebro. En la lluvia extrema de verano la tendencia no es significativa (cambios entre un -15 y un +15%).*

*Otros estudios indican una disminución de la probabilidad de ciclones en el Mediterráneo, por lo que se espera una disminución de la precipitación extrema en el Mediterráneo español.*

##### ◆ Proyecciones sobre el caudal

En cuanto a los caudales, las proyecciones de caudal máximo en cursos fluviales se han obtenido a partir de la modelación hidrológica con datos climáticos (precipitación, temperatura, etc.) proyectados a futuro por modelos climáticos (GCMs o RCMs).

Los resultados obtenidos a escala del continente europeo están sujetos a una elevada incertidumbre debido a que resulta difícil proyectar la frecuencia y la magnitud de las inundaciones, y a que los modelos climáticos presentan dificultad para representar los extremos de lluvia con recurrencia mayor de 1 en 30 años. Igualmente, los datos de caudales que permiten calibrar los modelos

hidrológicos son escasos tanto en tiempo como en distribución espacial. Por otro lado, en aquellas estaciones de aforo con series de información más largas, se encuentran inconsistencias en el registro histórico debido a los cambios en la morfología del río, la construcción de presas, desvíos de agua, así como otros cambios de tipo ambiental (uso del suelo) y el cambio climático.

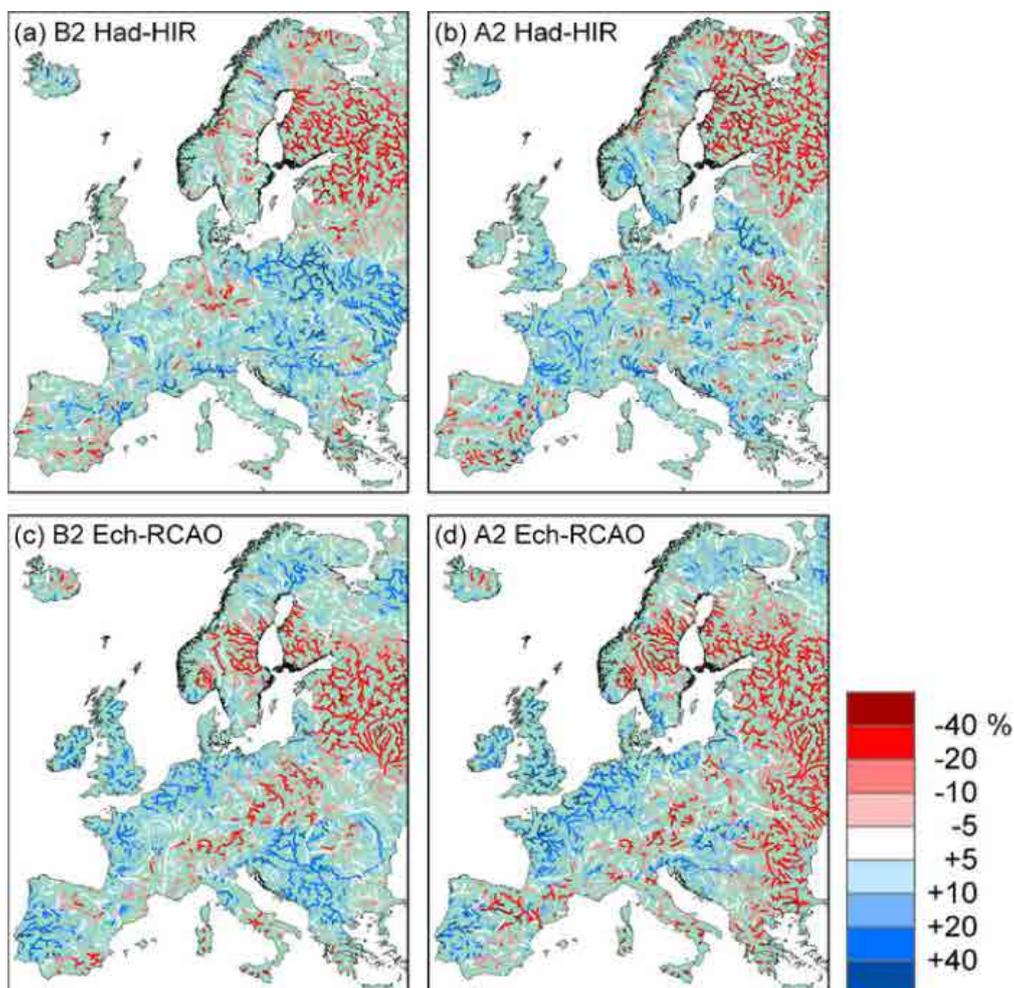
Previo al último informe del IPCC, Dankers y Feyen (2009) analizaron los cambios en los caudales, y más concretamente los caudales máximos de inundación (**Figura 12**), mediante simulaciones de dos RCMs y dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (A2 - similar al RCP 8.5; y B2 - similar al RCP 4.5) del Cuarto Informe del IPCC.

Feyen et al. (2012) también analizaron los impactos potenciales del cambio climático en los caudales de los ríos en relación con inundaciones y con sequías, utilizando datos de distintos RCMs. Este estudio se centró en los cambios proyectados para finales del siglo actual bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2 (similar al RCP 8.5) del Cuarto Informe del IPCC.

A escala de cuencas hidrográficas, se comprobó que el uso de una combinación diferente de modelos climáticos o asumiendo escenarios de emisiones distintos, a veces resultan en una señal de cambio climático diferente o incluso opuesta en la magnitud de inundación. Sin embargo, algunos de estos cambios resultaron ser robustos, especialmente en el noreste de Europa, donde se observó una disminución general en el caudal de inundación en el período 2071-2100, lo que sugiere una reducción en el riesgo de inundaciones extremas por fusión de nieve (principal causa de inundaciones en estas regiones).

Algunos de los aumentos en la frecuencia de inundación que se detectaron en otras cuencas hidrográficas europeas, sobretudo del sur, podrían atribuirse al menos en parte a una gran variabilidad natural a escala decadal en el clima simulado, lo que significa que estos cambios pueden ocurrir naturalmente cuando se comparan dos períodos de 30 años, incluso sin un cambio en la tasa de emisiones (Dankers y Feyen, 2009).

**Figura 12.** - Cambio relativo del caudal de T100 años entre el escenario (2071-2100) y el periodo de control (1961-1990). Según Dankers y Feyen (2009).



En el resto de Europa se observa un patrón complejo, con proyecciones que indican tanto aumentos como disminuciones en los caudales máximos de los ríos. Algunos de estos cambios producen aumentos considerables en los caudales punta, aunque no siempre en la misma región. Por ejemplo, el GCM ECHAM (abreviado en la **Figura 12** como 'Ech' - las dos gráficas inferiores) produce un aumento del caudal de 100 años de periodo de retorno en Europa Occidental, incluidas las Islas Británicas. Por otro lado, el GCM HadAM3H (abreviado en la **Figura 12** como 'Had' - las dos gráficas superiores) muestra mayores aumentos en Europa del Este, concretamente en los Balcanes, para el escenario B2.

Otro aspecto reseñable es que los cambios en el escenario B2 son generalmente de la misma magnitud, comparativamente hablando, a los del escenario A2, aunque el aumento de la temperatura sea mayor en este último (Dankers y Feyen 2009).

### CONCLUSIÓN: CAMBIOS EN INUNDACIONES SEGÚN LAS PROYECCIONES FUTURAS EN EUROPA

*Debido a la gran variabilidad natural que tiene el clima de la Península Ibérica, no es fácil obtener conclusiones significativas (al menos en la tendencia del cambio).*

*En Europa, algunas regiones presentan un cambio claro en las inundaciones, por ejemplo en el norte de Europa (con aumentos) o en el este (con descensos).*

*Los resultados muestran que se va a producir una transformación, especialmente en aquellas zonas con nieve o en zonas muy urbanizadas.*

Una conclusión similar de la variabilidad de las proyecciones puede obtenerse del estudio de Lehner et al. (2006) donde se presentan proyecciones con signo contrario (aumento vs disminución) en el sur de Europa.

Con respecto a las regiones con predominio de nieve, las inundaciones como resultado del deshielo se adelantarán a finales del invierno, y algunas proyecciones indican que disminuirán su frecuencia (Dankers y Feyen, 2008).

Además, las inundaciones pluviales en zonas urbanas, provocadas por intensos episodios locales de precipitación, serán probablemente más frecuentes en toda Europa (Christensen y Christensen, 2003; Kundzewicz et al., 2006).

A partir de la información y los supuestos proporcionados por el último informe del IPCC, también se han realizado estudios a nivel europeo. Así, encontramos los estudios de Alfieri et al., (2015a, 2015b y 2016). Estos estudios se basan en modelos climáticos regionales acoplados en modelos hidrológicos que cubren Europa, aplicando resultados derivados de los escenarios antes descritos del Quinto Informe del IPCC.

En la **Figura 13** se muestra el cambio en las inundaciones con periodo de retorno de 100 años (T100) entre el periodo de referencia (1976-2005) y tres periodos futuros (2020; 2050; 2080), basado en el modelo hidrológico LISFLOOD y un conjunto de siete RCMs (Alfieri 2015a y 2015b). Los ríos en azul indican un aumento en el caudal de inundación (T100) y los ríos en rojo indican una disminución. Para finales del siglo XXI, el mayor aumento de las inundaciones con periodo de retorno de 100 años se proyecta para las Islas Británicas, el noroeste y el sureste de Francia, el norte de Italia y algunas regiones del sudeste de España, los Balcanes y los Cárpatos. Se prevén ligeros incrementos para Europa Central, la parte superior del Danubio y sus principales afluentes.

Por el contrario, se proyecta una disminución en la magnitud de las inundaciones con periodo de retorno de 100 años en grandes partes de Europa nororiental debido a una reducción en la acumulación de nieve, y por lo tanto de las inundaciones asociadas a la fusión, bajo temperaturas más bajas de invierno. Estos resultados son consistentes con estudios anteriores (Dankers y Feyen, 2009).

### CONCLUSIÓN: TENDENCIAS A FUTURO EN INUNDACIONES

*A continuación se muestra una tabla con un resumen de las tendencias en las inundaciones proyectadas a futuro:*

**Tabla 3.- Resumen de los cambios más significativos y robustos sobre las tendencias de caudales Q<sub>100</sub> en Europa (Alfieri et al., 2015a; EEA, 2017)**

Aumento en inundaciones de 100 años de periodo de retorno para finales del siglo XXI	Disminución en inundaciones de 100 años de periodo de retorno para finales del siglo XXI
Islas Británicas, NE y SE de Francia, N de Italia y algunas regiones del SE de España, los Balcanes y los Cárpatos de Europa central, la parte superior del Danubio y sus principales afluentes.	NE de Europa

Los mapas de la **Figura 13** muestran el valor promedio de inundación de varios modelos (Alfieri et al., 2015a); Sin embargo, los resultados de cada modelo pueden diferir sustancialmente. Además, todos los resultados están sujetos a incertidumbre, derivados de varios factores (Alfieri et al., 2015a). Por ejemplo, las incertidumbres vinculadas a los escenarios climáticos que se utilizan como base para las proyecciones. El modelo hidrológico (LISFLOOD) implementado en el estudio de Alfieri et al., (2015a) está limitado a los ríos más grandes de Europa, que pueden no ser representativos de un país o región en su conjunto.

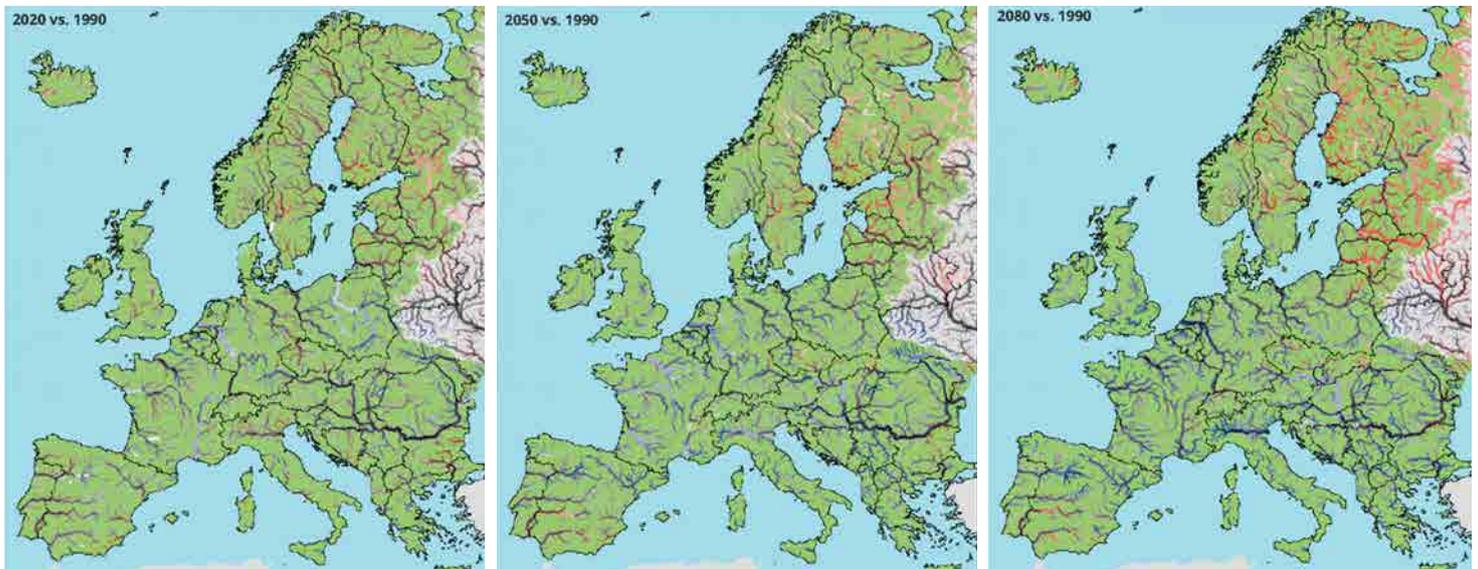
Por ejemplo, en el norte de Europa, las inundaciones dominadas por las lluvias intensas en ríos más pequeños pueden aumentar debido a los incrementos proyectados en las cantidades de precipitación, incluso en aquellas zonas del norte de Europa donde la proyección de las crecidas por fusión de nieve muestran una disminución en su frecuencia y magnitud (Vormoor et al., 2016). Por otro lado, la escasez de datos de aforos en calidad y cantidad adecuadas constituye un motivo de

incertidumbre en las proyecciones, ya que el material para la calibración y validación no resulta satisfactorio (Kundzewicz et al., 2017).

En estas proyecciones del Joint Research Centre- JRC (Alfieri et al., 2015a) se espera que los cambios en las frecuencias de inundaciones más frecuentes (comunes), pero menos graves, tengan efectos económicos menos significativos y afecten a menos personas. Por su parte, pequeños cambios en los eventos más grandes, como los correspondientes a un período de retorno de 500 años, pueden derivar en elevados daños económicos.

Para una serie de cuencas hidrográficas europeas, entre ellas las del Po, el Duero, el Garona, el Ebro, el Loira, el Rin y el Ródano, se proyecta un aumento de las inundaciones extremas de período de retorno superior a 500 años utilizando el modelo LISFLOOD. Por el contrario, los modelos proyectan en otras cuencas hidrográficas, como Guadiana y Narva (río de Europa nororiental), una disminución de la frecuencia total de las inundaciones (Alfieri et al., 2015a).

**Figura 13.** - Cambio proyectado en el caudal máximo diario para un periodo de retorno de 100 años ( $Q_{100}$ ). Cambio relativo para los periodos 2006-2035 (2020), 2036-2065 (2050) y 2066-2095 (2080) en comparación con la media de conjunto de la línea de base (1976-2005). (Alfieri et al., 2015a). Fuente: Projected change in river floods with a return period of 100 years, Joint Research Centre (JRC). Disponible en la web de la European Environmental Agency.



Projected change in the magnitude of river floods with a return period of 100 years.

Percentage



© European Union 2016 Source: Joint Research Centre

### 2.3.2. Proyecciones futuras para España

#### Proyecciones sobre la precipitación

Los estudios sobre cambio climático en España comenzaron, desde entidades oficiales, con el Tercer Informe de cambio climático desarrollado por el IPCC (IPCC, 2007).

Desde AEMET se desarrollaron modelos estadísticos de regionalización para España para obtener series de distintas variables climáticas afectadas por el cambio climático, basadas en GCMs (Morata, 2014). Con los datos obtenidos, AEMET realizó, entre otras variables, un estudio sobre la evolución de la precipitación. Los análisis realizados muestran resultados coherentes en todos los estadísticos escogidos para caracterizarla.

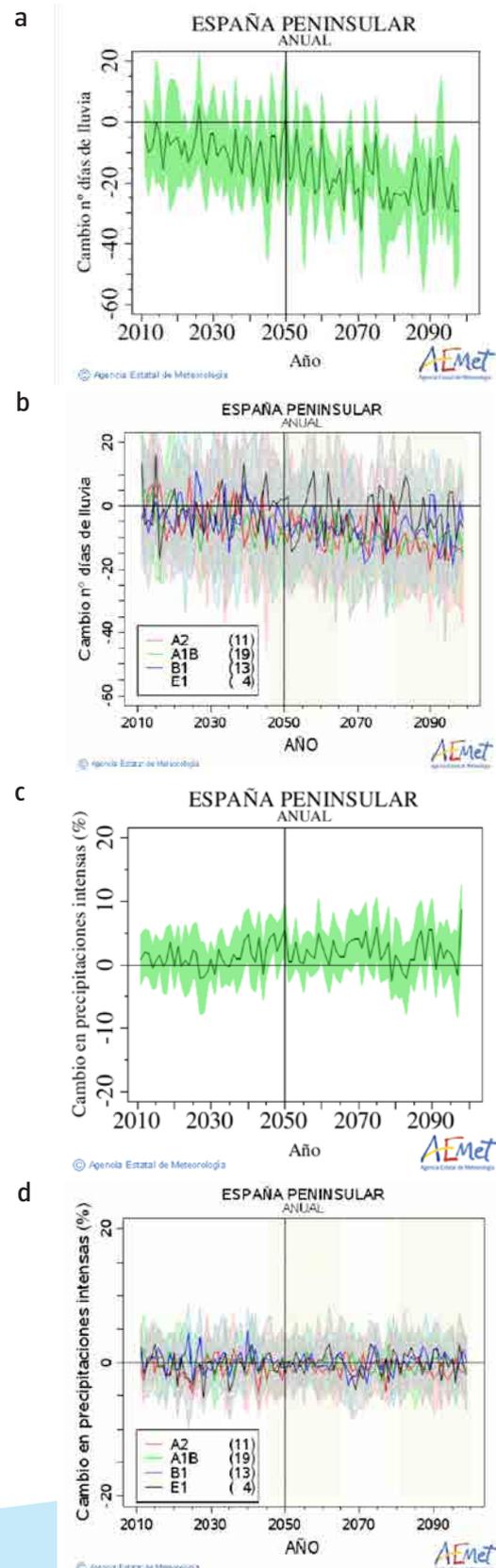
En primer lugar, se muestra (**Figura 14a**) la evolución temporal del número de días con lluvia usando modelos regionalizados (RCMs). Se aprecia una disminución de los días de lluvia en todas las regiones (Morata, 2014). Esto es, el número de días donde se produce lluvia, aunque sea escasa. Así, un valor negativo en este índice indica que va a llover menos, aunque puede hacerlo más intensamente. Los modelos climáticos muestran valores por debajo de cero durante todo el período, así como una variabilidad decenal bastante clara.

La **Figura 14b** muestra la evolución temporal del número de días con lluvia pero mediante técnicas estadísticas aplicadas a GCMs. Así, se puede apreciar una disminución menos clara de este índice. Para la mayor parte de los escenarios, los valores se mantienen próximos a cero. Únicamente los valores correspondientes al escenario A2 presentan valores por debajo de cero durante la mayor parte del período.

Los rangos de incertidumbre (bandas verdes y grises alrededor de las líneas de colores) son en general, similares para todos los escenarios. Los valores más altos se localizan en las regiones del norte y centro peninsular, mientras que en las regiones del sur y Levante son sensiblemente menores (no mostrado en las gráficas).

Además, Morata (2014) también ha estudiado los cambios esperados en este índice asociados a la frecuencia de la ocurrencia de precipitaciones intensas (**Figura 14 c y d**). En estas gráficas se muestra la evolución anual del índice promediada espacialmente. En el caso de los resultados de los RCMs (**Figura 14c**), la mayor parte de los valores se encuentran por encima de cero, es decir, se espera un aumento de la tasa de precipitaciones intensas, aunque sin tendencia aparente. Sin embargo, en los resultados obtenidos con técnicas estadísticas (**Figura 14d**), los valores se encuentran en torno a cero, aunque con un valor mayor en los de sentido positivo. Los valores de incertidumbre de este índice son mayores en las regiones del sur y Levante.

**Figura 14.** - Cambios del valor medio anual de los índices extremos de días consecutivos con lluvia (a)-(b), y precipitaciones intensas (c)-(d) en la España peninsular para el siglo XXI obtenidos mediante técnicas de regionalización dinámica (izquierda) y estadística (derecha). Entre paréntesis se recoge el número de proyecciones realizadas para cada escenario. En línea continua (sombreada) se representa el valor promedio (incertidumbre). En (b) las franjas verticales sombreadas indican las ventanas temporales en las que el número de regionalizaciones es máximo. Según Morata (2014).



Gallego et al. (2011) y Costa et al. (2012), han realizado estudios similares obteniendo resultados parecidos para los siglos XX y XXI respectivamente, en el contexto de la Península Ibérica.

### CONCLUSIÓN: CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN SEGÚN LAS PROYECCIONES DE AEMET PARA ESPAÑA

*Con datos de precipitación regionalizados para España y utilizando como consideraciones de partida las indicaciones del Tercer Informe del IPCC, AEMET obtuvo una disminución de los días con precipitación pero también un aumento en su intensidad. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por estudios similares realizados para la Península Ibérica.*

Por otro lado, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), elaboró un informe detallado sobre el impacto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas en España (Barranco et al., 2014) usando 8 escenarios climáticos regionalizados (4 modelos GCM de clima con escenarios A2 y B2) partiendo de datos de AEMET y del Tercer Informe del IPCC.

En este informe del CEDEX se analizaron dos tipos de series de precipitaciones máximas en las estaciones

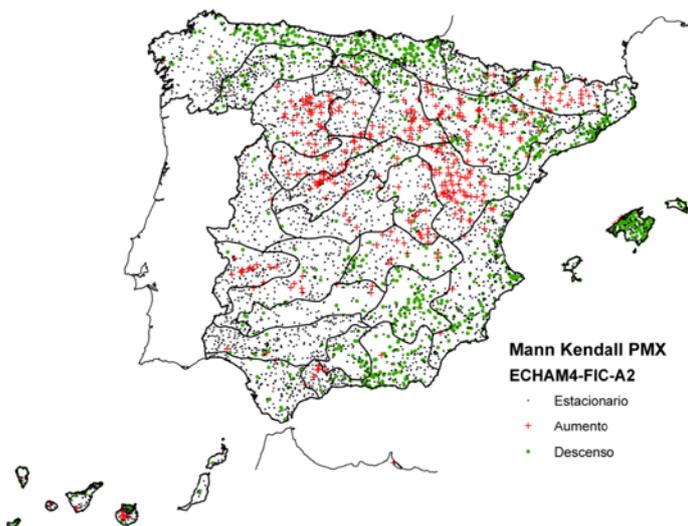
meteorológicas seleccionadas: máximas precipitaciones diarias de cada año, y la fracción de la precipitación anual debida a eventos diarios que superan el percentil 95 de precipitación (en el rango de precipitación máxima o intensa). Se analizaron las tendencias en el periodo 2011-2100, los cambios en la media o mediana, la variabilidad, la estacionalidad, la probabilidad de ocurrencia asociada a un periodo de retorno, y se realizó un análisis estadístico de las estaciones y regiones (CEDEX, 2010). Este informe destaca la incertidumbre de los resultados, con escasa señal de cambio climático en las 8 proyecciones climáticas.

En relación con las precipitaciones máximas anuales, el citado informe destaca que no hay evidencias de un aumento generalizado de las mismas conforme avanza el siglo XXI (**Figura 15**). Solo en algunas zonas de la submeseta norte (Duero, cabeceras del Tajo al Segura y Pirineos) se observa un aumento que no es evidente en el resto de España. No obstante, sí aumenta la proporción de la precipitación máxima diaria respecto a la precipitación anual debido al mayor peso del descenso de esta última (**Figura 16**).

En cuanto a la estacionalidad, no parece haber variaciones importantes salvo ligeros desplazamientos mensuales.

Las proyecciones proporcionan diferentes resultados en las distintas regiones, lo que hace difícil determinar un patrón espacial de variación. Sin embargo, por Demarcaciones, los resultados que se obtienen son los siguientes (**Tabla 4**):

**Figura 15** . - Cambios en precipitación máxima diaria (PMX) respecto al periodo de control (1961-1990). (CEDEX, 2010)



**Figura 16** . - Fracción de la precipitación diaria percentil >95% respecto a la precipitación total anual (CEDEX, 2010).

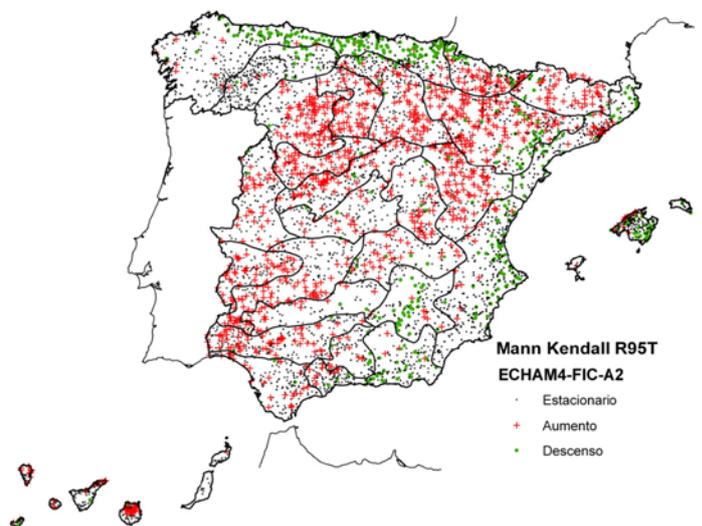


Tabla 4.- Principales resultados obtenidos para las Demarcaciones Hidrográficas en relación al estudio del CEDEX (2010). PMX: Precipitación Máxima diaria anual.

DEMARCACIÓN	COMENTARIOS SOBRE PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL
Galicia - Costa	En la costa, algunas proyecciones cziel último periodo del siglo XXI
Miño-Sil	Las proyecciones HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM muestran un aumento de las PMX al final del s. XXI
Cantábrico Oriental	No se han observado variaciones en la ocurrencia de eventos extremos en las Cuencas Internas del País Vasco
Duero	ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM muestran una tendencia al aumento de las PMX durante el s. XXI
Tajo	ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM muestran un aumento de los eventos máximos, especialmente en cabecera y en la última mitad del s. XXI
Guadiana	ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM prevén un aumento en la magnitud de PMX
Guadalquivir	Solo HadCM3-SDSM muestra alguna variación en la previsión de PMX
Cuencas mediterráneas andaluzas	Solo CGCM2-FIC dan aumentos en las PMX hacia finales del s. XXI
Segura	Las proyecciones HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC las que dan un aumento de PMX conforme avanza el s. XXI
Júcar	Las proyecciones HadAM3-FIC, HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC muestran un aumento de la magnitud de PMX en la última mitad del s. XXI
Ebro	ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM en las que aumenta hacia finales del s. XXI la magnitud de las PMX
Cuencas Internas de Cataluña	Esta Demarcación es la única en las que parece haber un acuerdo en los resultados que arrojan todos las proyecciones, mostrando todas un aumento de las PMX sobre todo en el último periodo del s. XXI
Islas Baleares	Solo HadCM3-SDSM muestra cambios en el registro de eventos máximos
Canarias	No se ha observado una variación clara en la ocurrencia de eventos extremos

### CONCLUSIÓN: CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN SEGÚN EL INFORME DEL CEDEX

*Los resultados anteriores muestran un aumento de las precipitaciones máximas anuales conforme avanza el siglo XXI, especialmente en su final. Este aumento se da en las regiones del centro y noreste de la Península, mientras que las costas, tanto norte como sur, no existe una tendencia significativa de cambio.*

En los últimos años se han publicado algunos trabajos sobre valores extremos de precipitación y caudal que han considerado los datos de proyecciones del CMIP5 del Quinto informe del IPCC (IPCC, 2014).

En general, existe un consenso en que las proyecciones del CMIP5 muestran un descenso en la precipitación anual media, alcanzando un descenso promedio del 30% en las estimaciones de los RCMs (Fernández et al., 2017). Por su parte, las proyecciones en las lluvias máximas diarias son ambiguas y los cambios futuros

presentan un mayor grado de incertidumbre, debido a la existencia de una gran variabilidad anual y estacional de las precipitaciones (e.j. Capel, 1998)

Entre otras dificultades, los modelos climáticos tienden a promediar arealmente los valores diarios de precipitación, y difícilmente pueden simular los valores más extremos de precipitación diaria observada en el registro histórico. Como referencia, algunos máximos diarios registrados en la red de estaciones climatológicas de la AEMET incluyen: 817 mm (Oliva, Valencia el 3 Nov 1987; Armengot-Serrano, 1994), 600 mm (en horas, Almería, 17 Oct 1973; Gil y Olcina, 1999), 503 mm (Bilbao, 1983; Ugarte y González 1984).

Monjo et al. (2016) utilizaron predictores del CMIP5 para el estudio de extremos de precipitación con periodos de retorno de 50 y 100 años, aplicando un doble análisis de análogos (patrones meteorológicos similares producen fenómenos meteorológicos similares) y de regresión estadística regionalizada (downscaling estadístico).

En primer lugar, analizaron 144 pluviómetros seleccionados usando un umbral de precipitación diaria de 250 mm para un periodo de retorno de 100 años - es decir, aquellas estaciones que para un periodo de retorno de 100 años tuvieran como mínimo una precipitación de 250 mm.

Las series observadas de las estaciones previamente seleccionadas se prolongaron mediante la técnica de reanálisis (con la base de datos Europea ERA40; Uppala et al., 2005) para conseguir series temporales de precipitación más largas (1958-2000), aumentando la cobertura espacial de los datos siguiendo una retícula. La técnica del reanálisis es una técnica que, al igual que los modelos climáticos, simula el comportamiento del clima pero con el objetivo de analizar el pasado. Con esta técnica, se pueden prolongar las series pasadas donde faltan datos observados.

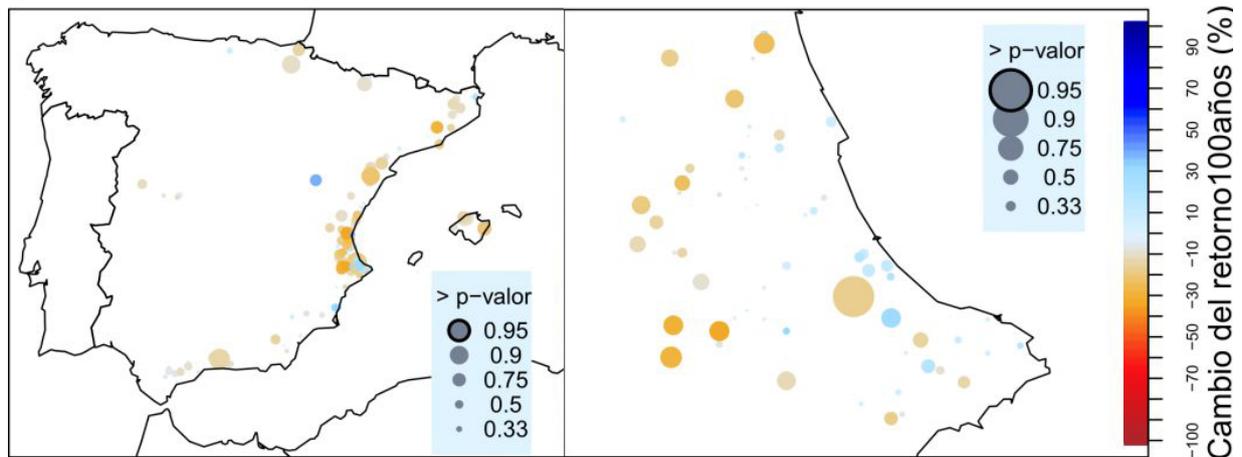
Posteriormente, estas series prolongadas con la técnica del reanálisis fueron utilizadas para corregir las proyecciones climáticas a futuro de acuerdo a un método estadístico paramétrico llamado 'cuantil-cuantil', que corrige las series temporales de precipitación mediante la comparación de las leyes de frecuencia de ambas series.

Para estudiar el comportamiento de la precipitación, se ajustaron cinco tipos de distribuciones de frecuencia: Gamma, Weibull, Gumbel, Reversed Gumbel y la Log-lo-

gística o distribución de Fisk. Se ajustaron las funciones acumulativas empíricas (es decir, las curvas completas y no sólo el extremo de la curva) y se estimó la precipitación proyectada de acuerdo a varios periodos de retorno (10, 20, 50 y 100 años) y diferentes periodos de tiempo futuro. El resultado de los cambios proyectados en el periodo 2051-2100 en relación al control 1951-2000 es similar (en términos de signo y valor) para los cuatro periodos de retorno.

Las proyecciones indican una disminución en la precipitación media anual (entre -7 y -20%). En el caso de los patrones de lluvia intensas (percentil 95 de la serie completa de precipitación), las proyecciones muestran una ligera disminución, de entre -3 y -6% para la mayoría de las estaciones. Discriminando entre estas lluvias extremas, se muestra que para los escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), los cambios en las precipitaciones extremas son: entre -20% y +15% (periodo de retorno de 10 años) y entre -25% y +25% (periodo de retorno de 100 años). Estos cambios resultan poco significativos en comparación con la variación natural de la precipitación.

**Figura 17.** - Cambio de la precipitación extrema asociada a un período de retorno de 100 años, y significancia estadística (p-valores) del cambio esperado, de acuerdo con el escenario RCP 4.5 / RCP 8.5. La comparación se realiza entre el periodo 2051-2100 y 1951-2000. En la figura de la derecha, detalle de la zona más densa (Valencia). Según Monjo et al. (2016)



En resumen, se detectan posibles cambios en las precipitaciones extremas para el 2051-2100 en algunas regiones. Las precipitaciones máximas diarias (en 24h) de tipo DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos - coloquialmente denominada como gota fría) podrían disminuir hasta un 20% en algunas zonas durante episodios frecuentes (10 años de retorno), mientras que la precipitación máxima asociada a estas DANAs durante episodios menos frecuentes (hasta 100 años de periodo de retorno) se mantendría o aumentaría. La costa del sur de Valencia y el norte de Alicante muestran una mayor tendencia al cambio, con un posible aumento del 20% en ambos escenarios para la precipitación de 100 años de retorno (**Figura 17**). En esta zona, las precipitaciones extremas podrían experimentar un cierto desplazamiento hacia sectores más próximos a la costa mediterránea.

### CONCLUSIÓN: ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES SEGÚN LAS PREDICIONES DEL CMIP5 (IPCC) PARA ESPAÑA

*El estudio mediante regresión estadística regionalizada muestra descensos en la proyección (2051-2100) de la precipitación, tanto para precipitaciones medias (entre -7 y -20%) como para lluvias intensas (entre -3 y -6%). En el caso de lluvias extremas (T100 años) se mantendrían o aumentarían ligeramente en algunas zonas del sur de Valencia y Alicante.*



Estos resultados deben interpretarse con cautela debido al número limitado de proyecciones climáticas. De todos modos, este trabajo muestra que la metodología desarrollada es útil para estudiar las precipitaciones extremas bajo varios escenarios climáticos.

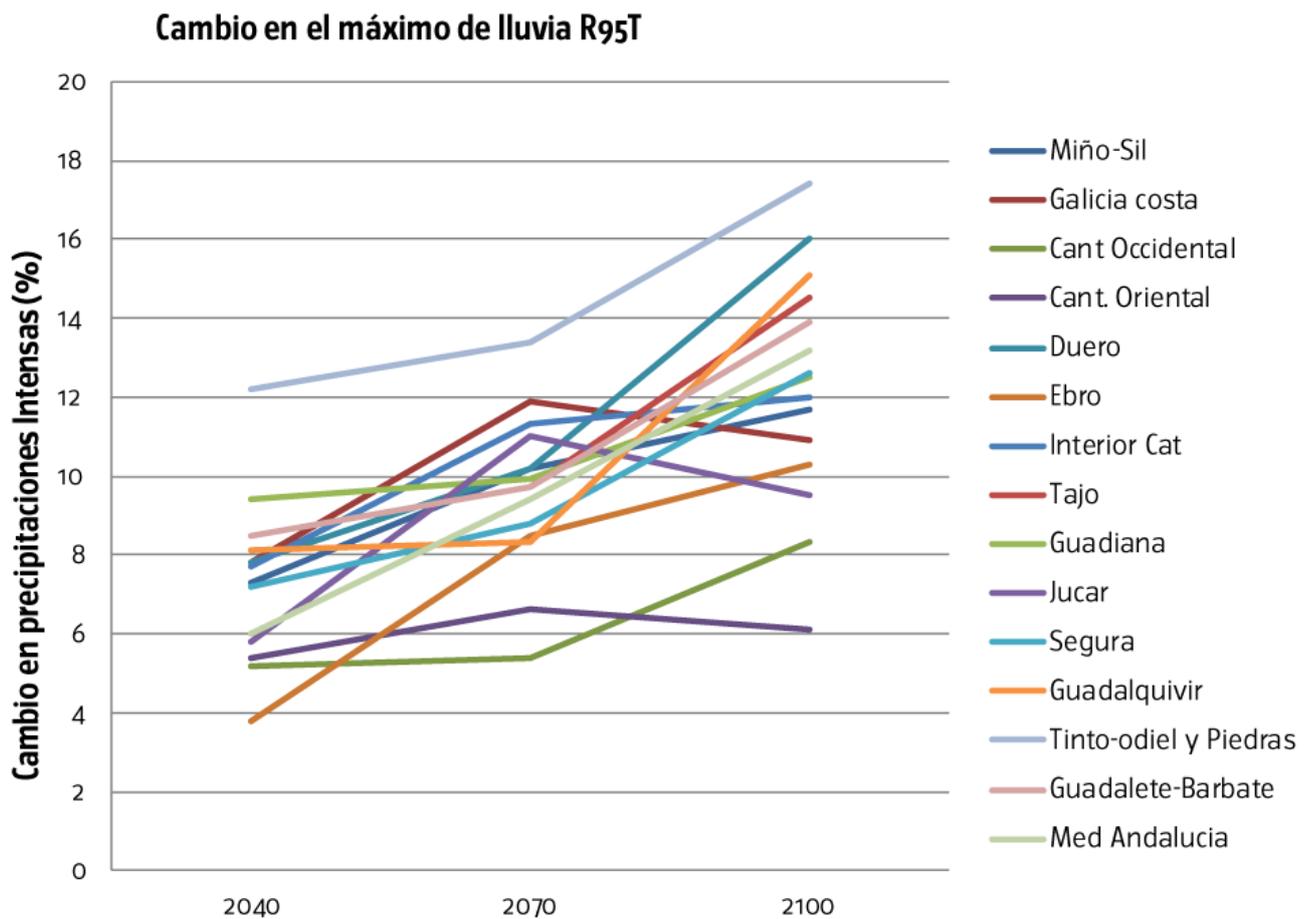
Recientemente, las proyecciones climáticas de variables particularmente dependientes de la escala regional y local, como es el caso de las lluvias intensas, se han mejorado sustancialmente en el contexto de la iniciativa EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014), que aplican modelización regional dinámica con resolución de 0.11 grados (EUR-11, malla de -12.5 km).

Al hilo de la revisión bibliográfica aquí expuesta, se ha realizado un análisis más específico para España. A escala de Demarcación Hidrográfica, se han recopilado las proyecciones medias procedentes de 10 modelos RCMs

(downscaling dinámico) procedentes del proyecto EURO-CORDEX, disponible en AEMET. Esta base de datos incluye el porcentaje de cambio anual en la precipitación extrema para tres horizontes temporales (2040, 2070 y 2100), respecto al periodo de control (1976-2005), para los 10 RCMs y dos escenarios de cambio climático (los previamente usados: RCP 4.5 y RCP 8.5).

Se ha calculado la media del porcentaje del cambio para los 10 RCMs, y cada horizonte temporal (2040, 2070 y 2100), y se ha extraído el valor máximo de cambio de la media anual. Este valor de cambio en el estadístico R95T (percentil 95 de la serie de precipitaciones; en %) representa un valor relativo de cambio esperable para precipitaciones extremas, y permite calcular el porcentaje de cambio para las diferentes Demarcaciones Hidrográficas (**Figura 18**).

**Figura 18.** - Cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.



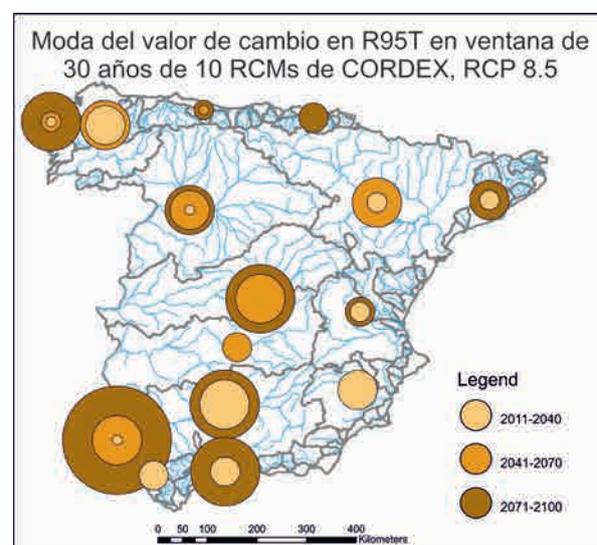
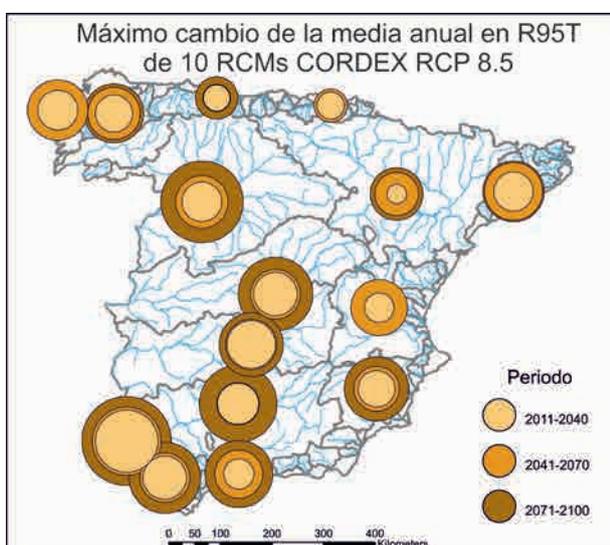
En la **Tabla 5**, se muestra que los mayores valores porcentuales de cambio para el periodo 2041-2070 se encuentran en las cuencas del suroeste (Tinto-Odiel), Galicia Costa, Cuencas Internas de Cataluña y Júcar. En el periodo 2071-2100, se muestra un incremento importante en el porcentaje de cambio de precipitación extrema para las cuencas del Duero, Guadalquivir y Tajo. Esta distribución de aumento de eventos extre-

mos en las grandes cuencas atlánticas ibéricas concuerda con los estudios publicados por Alfieri et al. (2015a), usando el modelo hidrológico LISFLOOD. Nótese sin embargo que este modelo LISFLOOD muestra un aumento en caudales proyectados en la cuenca del Ebro, que no se corresponde con el cambio en el máximo de lluvia R95T (**Figura 18 y Figura 19**).

**Tabla 5.- Cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.**

CAMBIO R95T (%)	2040	2070	2100
Miño-Sil	7.3	10.2	11.7
Galicia - Costa	7.8	11.9	10.9
Cantábrico Occidental	5.2	5.4	8.3
Cantábrico Oriental	5.4	6.6	6.1
Duero	7.8	10.2	16
Ebro	3.8	8.5	10.3
Cuencas Internas de Cataluña	7.7	11.3	12
Tajo	8.5	9.7	14.5
Guadiana	9.4	9.9	12.5
Júcar	5.8	11	9.5
Segura	7.2	8.8	12.6
Guadalquivir	8.1	8.3	15.1
Tinto, Odiel y Piedras	12.2	13.4	17.4
Guadalete-Barbate	8.5	9.7	13.9
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	6	9.4	13.2

**Figura 19 .- Distribución geográfica del cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Izquierda: Cambio máximo de la media anual en R95T. Derecha : Moda del valor de cambio en R95T. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.**



### CONCLUSIÓN: ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DEL PROYECTO EURO-CORDEX PARA ESPAÑA

*Los resultados muestran un cambio claro para todos los periodos de tiempo futuro: aumentan las precipitaciones máximas. Aunque en algunos periodos futuros, como el último (2071-2100) presentan mayor aumento, ocurre en todas las regiones (ver Tabla 5).*

Igualmente se analizó la moda (valor más repetido) en el porcentaje de cambio anual en las proyecciones EURO-CORDEX de precipitaciones extremas (10 modelos RCMs en cada periodo temporal de 30 años; ver Anejo). La mayor parte de las cuencas hidrográficas presentan la moda del porcentaje entre el 4 y el 7% en la precipitación máxima, que sería coherente con los cambios del 5% en la frecuencia de episodios de inundación (horizonte 2050) que algunos autores sugieren aplicar en aquellas regiones del contexto español donde no se disponga de datos robustos de proyección de precipitaciones extremas (Olcina Cantos, 2014). En las cuencas del sur peninsular (Mediterráneas Andaluzas, Júcar, Guadalquivir, Segura), existen cambios de signo en la moda que muestra la elevada variabilidad anual en el % de cambio en las precipitaciones extremas.

Por su parte, la mediana de los valores de porcentaje de cambio en las precipitaciones máximas resulta coherente en signo y aumento relativo entre los diferentes horizontes temporales, con cambios medios entre un 3 y un 6% para el periodo 2070 y entre un 4 y un 10% para el periodo 2100. Los mayores cambios se encuentran en las cuencas atlánticas y los menores se generan en la Demarcación del Cantábrico y regiones mediterráneas.

*La corrección de sesgo es un procedimiento que elimina los errores existentes entre los datos observados y los modelos climáticos, en el llamado 'periodo de control', que es el margen de tiempo pasado (p.e. 1960-2000).*

*En este periodo de control, los modelos climáticos también simulan datos y se analiza su similitud con los datos reales. En caso de existir sesgo, se corregiría.*

### ◆ Proyecciones sobre el caudal

Como se ha descrito anteriormente, la proyección de los cambios en las inundaciones en Europa no muestra una tendencia robusta y constante. De hecho, en el sur de Europa, y en España en particular, algunos modelos proyectan cambios en aumento, mientras que otros muestran una disminución en la misma región. Esta incoherencia se debe principalmente a diferentes métodos de regionalización y corrección de sesgos aplicados en diferentes estudios de cambio climático (Dankers y Feyen, 2009; Kundzewicz et al., 2017).

La elección de modelos hidrológicos resulta igualmente de suma importancia (Kay et al., 2009), y actualmente existen pocos estudios que hayan aplicado simultáneamente varios modelos hidrológicos para la proyección de caudales.

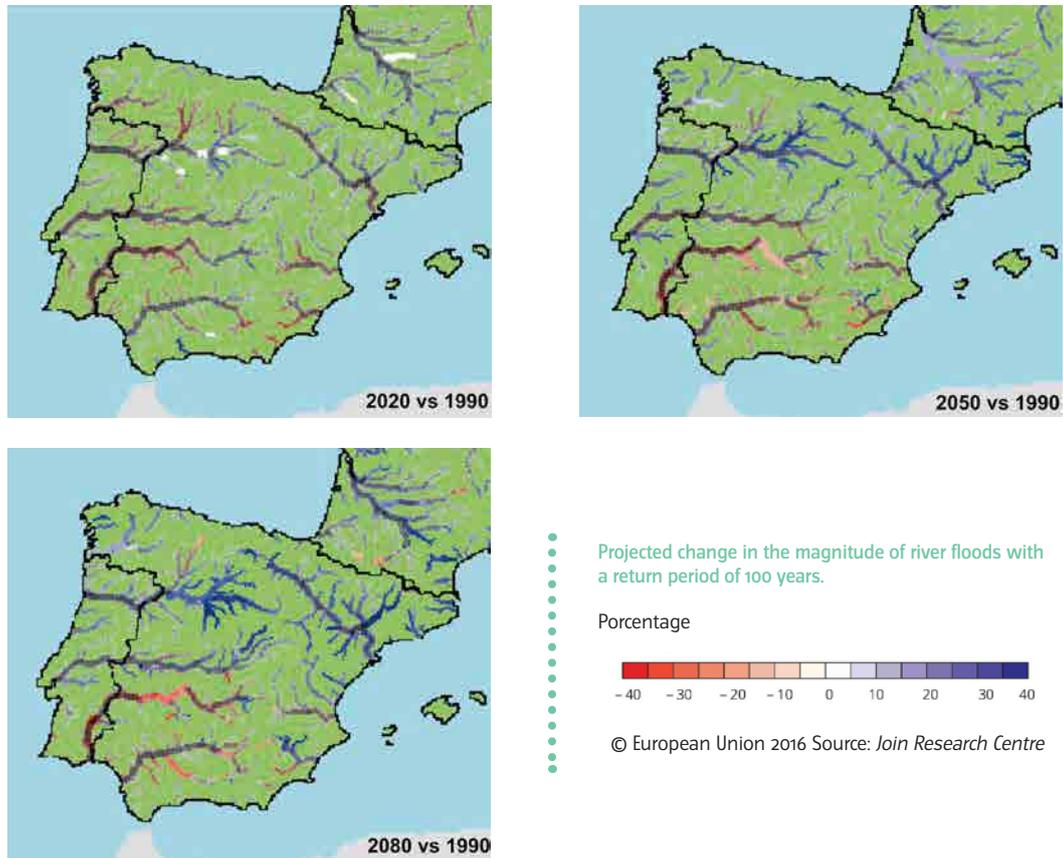
Igualmente, la proyección de los cambios en la frecuencia de inundación en periodos de retorno más altos (periodos de retorno por encima de los 100 años) es generalmente menos robusta que en periodos de retorno más bajos (Bell et al., 2007).

En España no se ha realizado un estudio sistemático de cambios proyectados en caudales de inundación basados en modelos climáticos acoplados con modelos hidrológicos. Sin embargo, los resultados obtenidos a nivel de Europa permiten detectar los grandes cambios esperables en las inundaciones en España, incorporando los datos climáticos del último informe del IPCC.

De esta manera, el estudio de Alfieri et al. (2015a), muestra para finales del siglo XXI una tendencia a aumentar el caudal de periodo de retorno de 100 años en los ríos del noreste de la Península (incluido el Ebro), Miño-Sil y Galicia Costa, Duero alto y medio, y en la cabecera del Segura (**Figura 20**). En los ríos Guadiana, Júcar y afluentes del Guadalquivir, se muestra una tendencia a la reducción de los caudales de periodo de retorno de 100 años, y en ocasiones se muestran resultados de signo contrario para diferentes horizontes temporales (**Figura 20**), demostrando la elevada incertidumbre de las proyecciones hidro-climáticas.

De acuerdo a la **Figura 20**, los cambios en los caudales para los distintos periodos futuros por Demarcaciones Hidrográficas se muestran en la **Tabla 6**. Se observa una elevada incertidumbre en estos datos, aunque se pueden extraer tendencias en algunas Demarcaciones Hidrográficas, siendo las cuencas del Duero y Ebro las que pueden presentar cambios positivos de hasta el 20%. Por su parte, las cuencas de Miño-Sil, Galicia Costa, Cantábrico Oriental, Cuencas Internas de Cataluña y Guadalete-Barbate presentan aumentos inequívocos de los caudales de periodo de retorno de 100 años.

**Figura 20.** - Detalle sobre cambio proyectado en el nivel de caudal diario máximo de 100 años ( $Q_{100}$ ) para la Península Ibérica (Alfieri et al., 2015a). El cambio relativo para los periodos 2006-2035 (2020), 2036-2065 (2050) y 2066-2095 (2080) se muestra en comparación con la media de conjunto de la línea de base (1976-2005).



**Tabla 6.-** Porcentaje del cambio proyectado en el nivel de caudal diario máximo de 100 años ( $Q_{100}$ ) en distintas Demarcaciones Hidrográficas. Extraídos de Alfieri et al. (2015a)

Cambio $Q_{100}$ (%)	2020	2050	2080
Miño-Sil	-10/+10	-5/+10	0/+10
Galicia - Costa	-10/+10	0/+10	0/+15
Cantábrico Occidental	-10/+10	0/+10	+5/+10
Cantábrico Oriental	-10/0	0/+10	0/+10
Duero	-10/+10	-10/+15	-10/+20
Ebro	-10/+10	-10/+15	-5/+20
Cuencas Internas de Cataluña	-5/+10	-5/+10	-0/+15
Tajo	-10/+10	-10/+10	-10/+15
Guadiana	-10/+10	-15/+10	-15/+10
Júcar	-10/+10	-10/+10	-10/+10
Segura	-10/+10	-10/+10	-10/+15
Guadalquivir	-10/+10	-10/+10	-15/+10
Tinto, Odiel y Piedras	-10/+10	-15/+10	-15/+10
Guadalete-Barbate	0/+10	0/+10	0/+10
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-10/+15	-10/+15	-10/+15

### CONCLUSIÓN: ESTUDIO DE LAS PROYECCIONES DE CAUDAL PARA ESPAÑA

Los resultados que se pueden obtener sobre el análisis del caudal de 100 años de periodo de retorno son inciertos, con diferentes tendencias según el modelo climático utilizado. Destacan las Demarcaciones del Miño-Sil, Galicia Costa, Duero y Ebro con un aumento de hasta un 15-20%, proyectado para 2050 y 2080. También la cuenca del Guadalete-Barbate, con un aumento del 10% en todos los periodos de tiempo estudiados.

### CONCLUSIÓN: TIPOS DE INUNDACIONES PROYECTADAS COMO CONSECUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA

Las conclusiones que se pueden extraer de la tabla 7, muestran un aumento de las crecidas relámpago en la mayoría de las cuencas de España, además de un aumento de las avenidas por efecto del deshielo en cuencas de los Pirineos y la vertiente sur de la cornisa cantábrica.

Además, en las Demarcaciones que sufren eventos de gota fría, se vería aumentada su frecuencia.

Como complemento al análisis cuantitativo, Benito et al. (2005a) han realizado un análisis de las tendencias registradas en algunas estaciones y que permiten proporcionar un conjunto de cambios cualitativos para las diferentes Demarcaciones Hidrográficas (Tabla 7).

En este análisis se pone de relieve el aumento de las inundaciones por deshielo rápido a finales de invierno o inicios de primavera como consecuencia del fuerte contraste térmico entre estaciones.

Tabla 7.- Análisis cualitativo de la respuesta de diferentes cuencas españolas a posibles impactos del cambio climático (Benito et al., 2005a)

Posible impacto del cambio climático	Cambio en la circulación zonal (NAO positiva)	Aumento de fenómenos de gota fría	Generación de núcleos convectivos	Cambios bruscos en la temperatura
Guadalquivir Guadiana Tajo	-Extremas +Ordinarias		+Crecidas relámpago	
Duero	-Extremas +Ordinarias		+Crecidas relámpago	+Crecidas por deshielo
Norte		+Irregularidad de extremos	+Crecidas relámpago	
Ebro			+Crecidas relámpago	+Crecidas por deshielo
Cuencas Internas de Cataluña		+Irregularidad de extremos	+Crecidas relámpago	+Crecidas por deshielo
Levante/Sur		+Irregularidad de extremos crecida/sequías	+Crecidas relámpago	

Símbolo "+" indica aumento de ese tipo de inundación, y "-" disminución.

## 2.4. Vulnerabilidad, exposición e impactos socio económicos

### 2.4.1. Cambios observados en daños e impactos

Las inundaciones constituyen el peligro natural más diverso, generalizado y destructivo. El carácter universal de las inundaciones las convierte en el riesgo natural más extendido en Europa, y las pérdidas económicas

asociadas han aumentado desde los años setenta hasta los años 2000 (Barredo, 2009). En España, las pérdidas económicas se concentraron en eventos concretos como los producidos en la Comunidad Valenciana en 1982 y en el País Vasco en 1983, que arrasaron el área metropolitana de Bilbao (CCS, 2010).

Estos eventos extremos son difíciles de atenuar por las infraestructuras que podrían gestionarlos. La regulación de las inundaciones en los ríos por las represas es muy eficaz para controlar las descargas de inundaciones de

pequeña magnitud, pero pueden presentar dificultades para regular los eventos más extremos (periodos de retorno mayores de 30 años) que, de hecho, causan el daño más grave y la preocupación social.

Separar los impactos derivados de las tendencias regionales de inundación severa asociadas con el cambio climático y los relacionados con los efectos de la urbanización y los cambios en el uso del suelo es difícil. A escala mundial, las estadísticas muestran que los daños por inundaciones debidos a los efectos del clima han aumentado el valor de los impactos por tres, mientras que los efectos de las actividades humanas han aumentado por nueve el valor de los daños desde 1970 (Kundzewicz et al., 2014).

### CONCLUSIÓN: VULNERABILIDAD Y EXPOSICIÓN

*El aumento de los problemas y daños que ocasionan las inundaciones es un hecho. Sin embargo, ¿hasta qué punto este aumento es atribuible al clima?*

*Según un estudio, aunque los efectos del clima han aumentado el valor de los impactos por tres, los efectos de las actividades humanas pueden haber causado un mayor aumento del valor de estos impactos.*

Una evaluación de las pérdidas económicas como consecuencia de las inundaciones en la Unión Europea durante el período 1970-2006, y considerando los efectos de los cambios en la población, la riqueza y la inflación en las pérdidas a nivel de país, no muestra ningún signo detectable del cambio climático inducido por el hombre (Barredo, 2009).

Según Barredo (2009), el aumento observado en las pérdidas directas por inundaciones se debe principalmente a factores sociales, al aumento de la urbanización y a la construcción de infraestructuras en las zonas tradicionalmente propensas a inundaciones. En cuanto a la modificación producida por el cambio climático en la magnitud y frecuencia de las inundaciones, sólo se han observado cambios ligeros que varían regionalmente. En consecuencia, las pérdidas económicas causadas por las inundaciones son el resultado del desarrollo socioeconómico combinado, el uso del suelo y los cambios inducidos por el clima.

En España, las pérdidas por inundaciones están cubiertas por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS),

una compañía pública de reaseguros que tiene como objetivo indemnizar los daños causados por eventos extraordinarios. Según el CCS (2010), cuatro de las inundaciones más perjudiciales (pagos en primas mayores de 130 millones de euros) ocurrieron en la década de los 80, dos en los años 90 y seis en los años 2000 (Figura 21A).

*El Consorcio de Compensación de Seguros, creado en 1941, indemniza los daños producidos por fenómenos naturales, únicamente cuando se tiene suscrito un seguro para las personas o bienes afectados.*

Durante el período 1971-2010, el coste económico relacionado con las inundaciones muestra una tendencia general al alza, aunque no se correlaciona con una tendencia igualmente positiva en el aumento de las inundaciones de mayor magnitud (eventos extraordinarios o catastróficos). La línea punteada horizontal indica los costes medios durante el período 1970-2009, sin considerar los daños extraordinarios de las inundaciones de 1983 en el norte de España (Benito y Machado, 2012).

Según Piserra et al. (2005) esta evolución se atribuye a una mayor penetración del seguro, a un aumento de la exposición de los bienes asegurados y al mayor volumen de capital asegurado, lo que muestra una estrecha correlación con el desarrollo socioeconómico en cada periodo o década.

La normalización realizada para la **Figura 21b** elimina la influencia temporal de los cambios en la exposición (factor poblacional resultado de la relación entre el número de habitantes en 2009 y el número de habitantes en un año dado) y la vulnerabilidad (factor de riqueza, proporción del PIB real per cápita en 2009 con respecto al valor de un año dado). El promedio móvil a 5 años (es decir la media de los 5 años anteriores conforme avanza el tiempo) de las pérdidas normalizadas muestra los costes de inundación atribuidos a la variabilidad natural de las inundaciones extremas.

Benito y Machado (2012) realizaron un proceso de normalización de las pérdidas históricas asociadas a inundaciones, con el fin de eliminar la influencia socioeconómica de la creciente exposición al riesgo, siguiendo la metodología descrita por Barredo (2009). Los datos de pérdidas anuales de inundaciones del CCS (2010) corresponden a euros actualizados a fecha 31-12-2009. Para eliminar el sesgo socioeconómico variable en el tiempo se normalizaron los daños teniendo en cuenta factores como la demografía, la riqueza (PIB) o la inflación, que se actualizaron a valores de 2009. Por un lado,



el factor de riqueza se definió como la proporción del PIB real per cápita en 2009 respecto al valor de un año dado. Por otro, el factor poblacional se definió como la relación entre el número de habitantes en 2009 y el número en un año dado. La **Figura 21B** muestra la distribución anual normalizada de las pérdidas por inundación, con el coste máximo en 1982 y 1983, 1987 y 1989.

Los resultados obtenidos muestran que en la década de los 90 las mayores pérdidas de inundación se produjeron en 1997, pero las series temporales no muestran una tendencia positiva sostenida en el tiempo, sino un aumento del número de incidentes contabilizados. De hecho, durante la segunda mitad de la última década las pérdidas anuales están muy por debajo del promedio anual (b). Estos resultados obtenidos para España son bastante similares a los descritos por Barredo (2009) para Europa en su conjunto.

Estos resultados muestran que los factores económicos (por ejemplo, el aumento del valor de la propiedad), el crecimiento demográfico y los factores geográficos (concentración en zonas muy expuestas) son los principales factores de exposición y vulnerabilidad que contribuyen al aumento de las pérdidas históricas por inundaciones. En este sentido, las regiones más vulnerables en España se encuentran a lo largo de la costa mediterránea, donde las inundaciones relámpago afectan a sectores socioeconómicos sensibles como el turismo y la industria, siendo el primero responsable de la mayor parte de la rápida y apresurada urbanización de la segunda mitad del siglo XX.

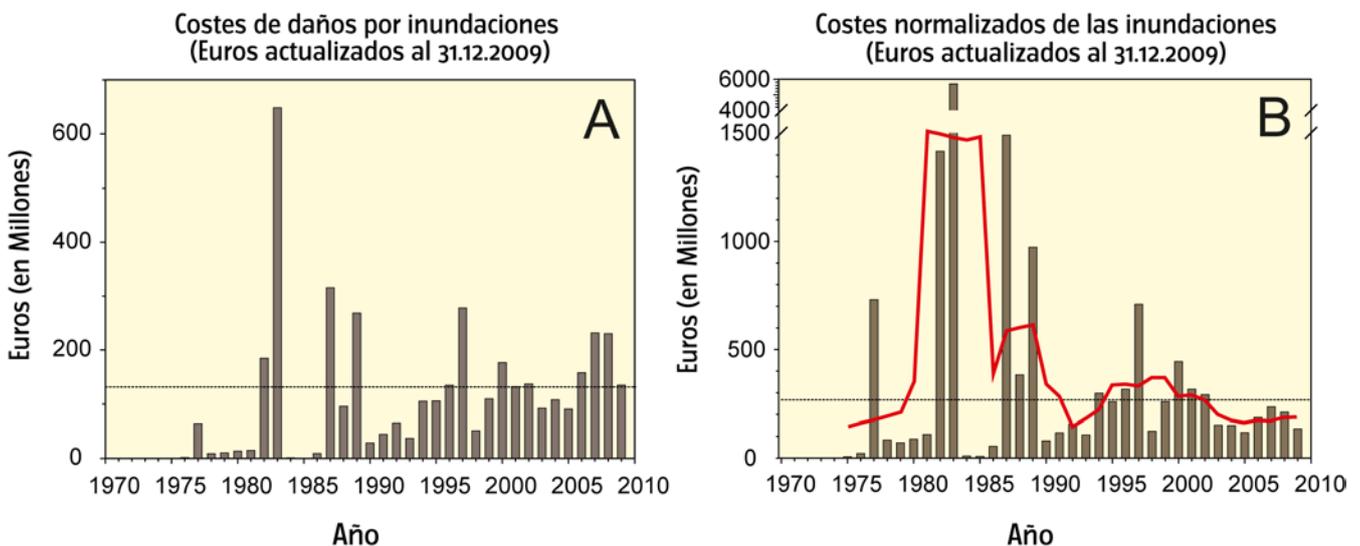
La media móvil a 5 años de las pérdidas normalizadas (**Figura 21b**) muestra una secuencia de períodos alternados con pérdidas por debajo y por encima del promedio anual que puede atribuirse a la variabilidad natural de las inundaciones extremas, mientras que la diferencia en las pérdidas con los valores proporcionados por CCS (2010) (**Figura 21a**) puede atribuirse a factores socioeconómicos. Estos resultados demuestran la importancia de la prevención y mitigación del riesgo de inundación en las zonas de alta densidad de población, lo cual tiene un impacto directo en la reducción de los daños causados por las inundaciones.

### CONCLUSIÓN: INUNDACIONES Y FACTORES SOCIOECONÓMICOS

*Los resultados en España muestran que los factores económicos, el crecimiento demográfico y los factores geográficos son los principales agentes que contribuyen al aumento del impacto de las inundaciones.*

*Las regiones más vulnerables en España se encuentran a lo largo de la costa mediterránea, debido sobre todo a las inundaciones relámpago o flash floods, a consecuencia, por ejemplo, de fenómeno de DANA (coloquialmente conocido como "gota fría").*

**Figura 21** - A: Costes anuales por inundaciones en España pagados por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS, 2010), en millones de euros actualizados al 31/12/2009. B: Pérdidas anuales debidas a inundaciones en España normalizadas considerando los efectos de los cambios en la población, la riqueza y la inflación (según Benito y Machado, 2012).



### 2.4.2. Cambios proyectados en daños e impactos

La incertidumbre de los efectos del clima futuro sobre las inundaciones, así como las variaciones socioeconómicas, conducen a un amplio abanico de estimaciones del coste de futuros daños causados por las inundaciones. Por ejemplo, se prevé que los daños anuales causados por las inundaciones fluviales en el Reino Unido aumenten en 2080 menos del doble de los daños actuales para el escenario B2 (asociado al RCP 4.5), pero en el escenario A1 (asociado al RCP 8.5) puede llegar a incrementar los daños en veinte veces más que la media actual (ABI, 2005).

Por otra parte, las primas futuras en el sector del seguro aumentarán sustancialmente si los eventos extremos aumentan su frecuencia. Esto se debe a que los costes asociados a los eventos catastróficos de periodo de retorno mayor (menor probabilidad de ocurrencia) son mucho más altos que los eventos más frecuentes. Por ejemplo, en el Reino Unido, el coste de un evento climático extremo de 1000 años es aproximadamente 2,5 veces mayor que el coste de un evento de 100 años (Handmer et al., 2012).

A nivel europeo, se han combinado los resultados de una evaluación del riesgo de inundación con mapas detallados de exposición. Los resultados sugieren que un escenario alto de cambio climático podría aumentar el impacto socioeconómico de las inundaciones en Europa más de tres veces a finales del siglo XXI.

Alfieri et al. (2018) han realizado una recopilación de tres estudios a nivel europeo sobre el riesgo de inundación futura bajo escenarios de cambio climático. Estos estudios utilizan las proyecciones climáticas de varios GCMs y RCMs, junto con modelos hidrológicos y modelos de inundación, para observar el cambio en las manchas de inundación y la exposición de la población.

A pesar de las diferencias sustanciales que hay entre los tres estudios, se pueden obtener algunas conclusiones coherentes. Así, se observa una clara tendencia de aumento de las inundaciones en el centro y el oeste de Europa para todos los escenarios de cambio climático considerados. En el este de Europa, se puede concluir una tendencia a la disminución de las inundaciones, aunque los resultados de los tres estudios dan resultados contrarios en algunos casos. Uno de los tres estudios, (Alfieri et al., 2015a), constata el mayor aumento del riesgo de inundación para Austria, Hungría, Eslovaquia y Eslovenia en concreto.

Por otra parte, el JRC también ha desarrollado diversos estudios para anticipar los impactos potenciales en relación con los cambios proyectados sobre la magnitud y la frecuencia de las inundaciones a partir de modelos climáticos e hidrológicos acoplados (Alfieri et al., 2016). Las zonas más sensibles a los extremos hidrológicos se corresponden con núcleos de alta densidad de

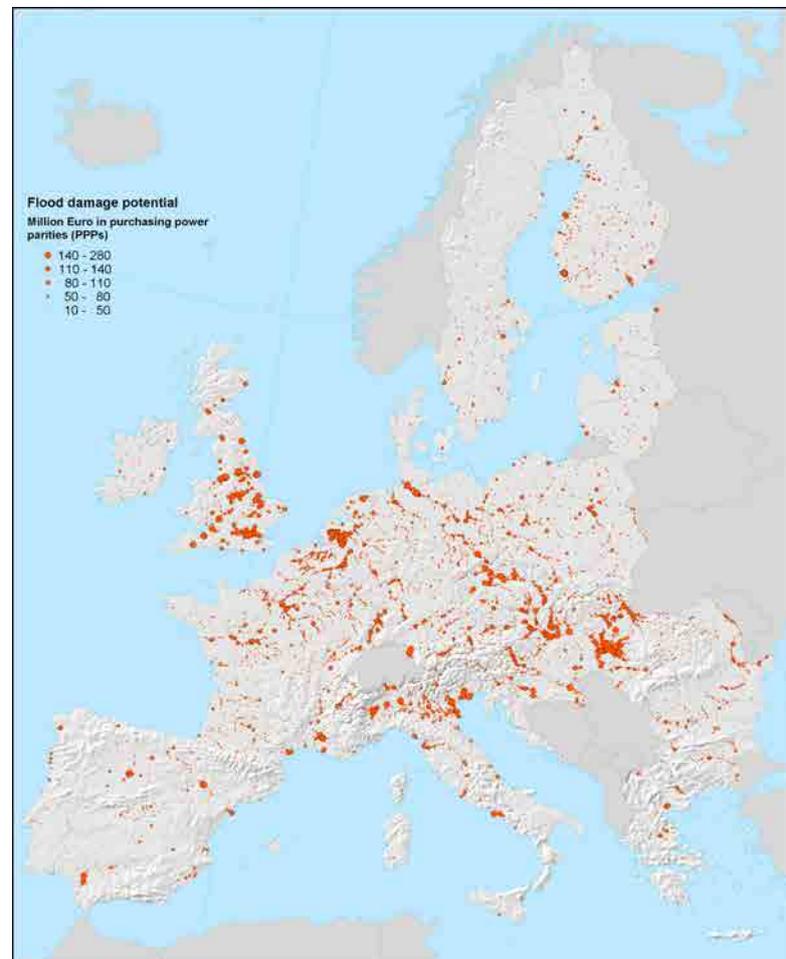
población con desarrollo habitacional reciente y con sectores socioeconómicos sensibles, como el turismo y la industria (Figura 22).

El aumento de las precipitaciones intensas de corta duración en la mayor parte de Europa es probable que conduzca a un mayor riesgo de inundaciones súbitas (EEA, 2017), que son las más perjudiciales en términos de impacto social (Handmer et al., 2012). Las zonas con mayor probabilidad estadística de sufrir inundaciones súbitas se encuentran en cuencas medianas o pequeñas del cinturón costero mediterráneo y en las regiones montañosas de Europa (Alpes, Pirineos; (Barredo et al., 2008; Munich\_Re, 2008).

En la zona mediterránea española, sin embargo, las tendencias históricas que apoyan este aumento de la frecuencia y magnitud de las crecidas relámpago no son muy robustas (Benito et al., 2005a).

En grandes cuencas hidrográficas, las inundaciones fluviales pueden eventualmente producir grandes daños como consecuencia de la expansión de nuevas áreas urbanas desarrolladas y en relación con las infraestructuras lineales (ferrocarriles y carreteras), que en ocasiones presentan un drenaje inadecuado (Arnell y Darch,

Figura 22 .- Mapa de daño potencial por inundaciones en Europa (Barredo et al., 2008).



2006). En pequeñas cuencas (con áreas menores de 500 km<sup>2</sup>) la severidad de las inundaciones se incrementa de forma exponencial por la deforestación y el uso agrícola de las áreas marginales (Rodríguez-Lloveras et al., 2015).

### CONCLUSIÓN: PROYECCIONES DE DAÑOS E IMPACTOS PROVOCADOS POR INUNDACIONES

*Según diversos estudios a escala europea, se espera un aumento de los daños en cuencas pequeñas (< 500 km<sup>2</sup>), especialmente en las regiones mediterráneas, debido a las llamadas inundaciones relámpago.*

*Por otro lado, en las cuencas grandes, se espera que se produzca un aumento de los daños en el caso de que se desarrollen nuevas áreas urbanas cercanas a los cauces.*

## 2.5. Principales opciones de adaptación

Anteriormente se ha descrito la elevada incertidumbre en las proyecciones de caudales máximos de periodo de retorno de 100 años para la Península Ibérica, que difieren considerablemente según el modelo climático (CGM-RCM) y escenario de emisiones (Alfieri et al., 2015a). El tratamiento de la incertidumbre, por lo tanto, requiere una cuidadosa consideración. Antes de realizar ningún cambio o establecer algún juicio sobre los escenarios futuros es necesario tener en cuenta todo el rango posible de incertidumbre, por parte de investigadores y de organismos de toma de decisiones (IAHR, 2015).

Los informes del IPCC (2014) muestran, sin embargo, que las proyecciones de temperatura media global durante un período de aproximadamente 20-30 años no varían tan ampliamente. Se puede concluir, al menos en la actualidad, que es una buena práctica estimar los cambios en un período de aproximadamente 20-30 años, al tiempo que se consideran los cambios a más largo plazo, de modo que se puedan tomar medidas de adaptación efectivas y específicas para abordar el impacto a largo plazo.

En el desarrollo de medidas de adaptación, es necesario definir qué suponen las medidas de control de inundaciones y establecer metas a corto plazo y largo plazo en vista de los grados de incertidumbre involucrados en las proyecciones para diferentes periodos de tiempo.

El cambio climático constituye un riesgo y una oportunidad para fortalecer las capacidades en la respuesta

frente a las inundaciones, la mejora en la evaluación del riesgo, y el avance en el mantenimiento, prácticas de renovación y normas de diseño de las nuevas infraestructuras (Arnell y Darch, 2006).

En las últimas décadas ha surgido un cambio de paradigma sobre el papel de las llanuras de inundación y las zonas aledañas a los cauces de los ríos, con una clara propuesta por parte de los gestores para proporcionar espacio al río. En este sentido, las llanuras aluviales y, en particular, los humedales y zonas de recreo, pueden jugar un papel importante de almacenamiento de agua y laminación de los picos de inundación. Una medida de adaptación obvia contra daños a la propiedad es mejorar las técnicas de construcción para que los edificios y las infraestructuras sean más robustos frente a los eventos climáticos extremos.

Este tipo de acciones ya están en marcha promovidas por la Dirección General del Agua del MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica), a través del programa PIMA ADAPTA y por parte de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC).

Los objetivos deben ser específicos, considerando cómo evitar, mitigar o asumir los riesgos identificados, así como definir el daño asociado a un desastre, las características naturales y sociales de las cuencas, los objetivos nacionales de desarrollo futuro y las limitaciones de la capacidad de inversión. La elaboración de estos objetivos específicos se debe ajustar a las características de las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) mediante estudios que recojan los medios para reducir el riesgo social, económico y ambiental.

### CONCLUSIÓN: ADAPTACIÓN PARA EL FUTURO

*Antes de considerar cualquier posible influencia relativa a los efectos del cambio climático, hay que estudiar detenidamente la incertidumbre asociada al mismo. La adaptación debe establecer metas a corto y largo plazo, conforme se vaya resolviendo esta incertidumbre.*

*Uno de los aspectos más importantes en esta adaptación es el cambio de paradigma de las llanuras de inundación, convirtiéndolas en extensiones para controlar y laminar las inundaciones futuras.*

Por otro lado, también deberían considerarse en algunos casos los efectos positivos de las inundaciones en la agricultura (como por ejemplo, la recarga de acuíferos) y la pesca, así como en la regeneración de las condiciones ambientales de los cauces y riberas fluviales.

Igualmente, en relación con el cambio climático resulta importante comprender completamente las características hidro-climáticas de cada cuenca, la situación socioeconómica y el rango y el límite de cada aplicación al desarrollar adaptaciones al cambio climático.

A continuación, se detallan algunas medidas de adaptación que han sido descritas en el ámbito de los planes estratégicos de adaptación al cambio climático en relación con las inundaciones (River Bureau, 2010; Sayers et al., 2017).

### 2.5.1. Medidas para reducir los riesgos de inundación

Estas medidas suponen la mejora o modificación de los cauces de los ríos, expandiendo la llanura de inundación y excavando el cauce, así como medidas estructurales para el control de las inundaciones. La mayor parte son medidas de fuerte impacto medioambiental, y se desaconseja su aplicación generalizada. Entre estas medidas se destacan las siguientes:

- **Medidas enfocadas a ríos**
  - **Medidas para mejorar el flujo del agua en los cauces**

Estas medidas se aplican para reducir las inundaciones en zonas residenciales pero tienen un elevado impacto medioambiental, por lo que su aplicación debe limitarse. Las principales actuaciones de este tipo son la excavación y dragado de cauces, la construcción de canales de descarga para incrementar la capacidad de descarga, el acortamiento de cauces y la construcción de compuertas (floodgates) en zonas de confluencia de ríos.

- **Medidas para el control de la escorrentía hacia los ríos**

Medidas encaminadas al almacenamiento de agua temporal que reduzca el pico de inundación y permita la laminación de las avenidas. Las principales medidas se concretan en: la operativa adecuada de presas, la mejora de las capacidades de prevención de la precipitación y la mejora de las presas existentes.

- **Medidas enfocadas a la gestión de las cuencas**

Estas medidas incluyen infraestructuras temporales de almacenamiento en parques, zonas deportivas, etc. y la mejora de la capacidad de infiltración en la cuenca mediante un manejo adecuado del suelo.

### 2.5.2. Medidas para el control del flujo de inundación

Estas medidas incluyen el control del flujo de inundación y el aumento de la seguridad en las llanuras de inundación mediante la instalación de diques secundarios, o medidas para el retorno del flujo a los ríos. También incluyen la disipación del flujo (diques abiertos), que permitan mejorar la seguridad en las zonas residenciales. Igualmente, incluyen la utilización de vegetación riparia como barrera para la disipación de la energía de las inundaciones, y para prevenir la rotura de diques y la mitigación de daños.

### 2.5.3. Medidas para reducir el daño en las llanuras de inundación

Estas medidas suponen la reducción de la vulnerabilidad de los usos del suelo ubicados en las llanuras de inundación y, en ocasiones, restricciones del uso del suelo y de la construcción de viviendas.

Para el caso de las edificaciones existentes, entre las medidas a implantar se encontrarían el aumento de altura de la planta baja de los edificios, la utilización de materiales específicos que no resulten dañados por la acción del agua o la distribución de los elementos sensibles hasta cotas más elevadas (como por ejemplo, colocar los equipos de generación y distribución de energía de los hospitales en pisos superiores).

### 2.5.4. Medidas de evacuación y guía

Las mejores opciones de adaptación radican en los avances de los sistemas y metodologías de prevención (cartografía del riesgo de inundación), la predicción (sistemas de alerta para cuencas medianas y grandes) y en la planificación y gestión de situaciones de riesgo.

Estas mejores prácticas se implantan actualmente a nivel técnico y de gestión, aunque durante el primer ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones no se ha considerado el efecto del cambio climático en las inundaciones.

Se trata de establecer criterios y sistemas de organización para la evacuación de personas, designando vías preferentes de evacuación o lugares seguros por encima de los niveles de inundación e incorporando la información sobre el nivel de agua en los ríos y la ofrecida por los sistemas de alerta.

Para que estas medidas de adaptación sean eficientes, resulta imprescindible la comunicación y educación en el riesgo de forma continuada mediante charlas o folletos informativos, fomentando la prevención y la reducción de la exposición. Este proceso de información y formación a la población debe ser incorporado en la escuela, incluyendo unas bases de cómo actuar en caso de una catástrofe.



La información en tiempo real sobre el evento y las instrucciones de evacuación se puede transmitir a través de teléfonos móviles, internet, redes sociales, etc.

### 2.5.5. Adaptación económica y del sector del aseguramiento

La industria aseguradora presenta varios enfoques para adaptarse al creciente riesgo climático, como puede ser aumentar el coste de las primas de las pólizas, restringir o eliminar la cobertura, el reaseguro, mejorar la remediación de las pérdidas (Dlugolecki, 2008), controlar de forma más estricta el desarrollo de la llanura aluvial o implantar medidas correctivas para los daños derivados de la acción meteorológica y eventos extremos (Dlugolecki y Lafeld, 2005).

## 2.6. Conclusiones sobre la revisión técnica sobre cambio climático

A escala global no existen evidencias calibradas que permitan determinar una tendencia de cambio generalizada durante las últimas décadas y que relacione un cambio en la magnitud o en la frecuencia de las inundaciones con el clima (IPCC, 2014). Por su parte, los desastres y daños causados por inundaciones en todo el mundo han aumentado desde 1970, aunque este aumento puede explicarse en términos de una mayor exposición de personas y activos económicos (Handmer et al., 2012).

### 2.6.1. Conclusiones sobre las observaciones (registros pasados)

En España, los registros de lluvia total muestran una disminución del 15% en los últimos 30 años, lo que afecta también a la frecuencia de las lluvias extremas en el Mediterráneo, donde se ha disminuido la probabilidad de ocurrencia (Valdes-Abellan et al., 2017).

Desde el punto de vista de la variabilidad estacional, durante el período 1961-2006 las lluvias tendieron a disminuir en invierno, primavera y verano en más del 70% de 553 estaciones meteorológicas analizadas; sin embargo, en otoño hubo un aumento de la lluvia en más del 65% de las estaciones (Río et al., 2011).

Los registros de caudales en ríos de estaciones de aforo en régimen "natural" identifican rupturas (cambios bruscos en la serie temporal) en la media de las crecidas anuales en el 55% de las series, de las cuales un 88% experimentan una disminución en la media posterior al punto de ruptura. Los puntos de ruptura se presentan en su mayoría durante el período de los años 60 a los 90, siendo más significativos durante la década de los 70 (López de la Cruz, 2013).

Se ha detectado una tendencia a retrasar la ocurrencia de inundaciones en el noroeste de España (Blöschl et

al., 2017). Sin embargo, la atribución de estas tendencias al clima no es unívoca, ya que puede explicarse por un aumento de la evapotranspiración que aumenta la pérdida de agua en los suelos y a la disminución de la humedad del suelo antes de la generación de las inundaciones (Mediero et al., 2014).

### 2.6.2. Conclusiones sobre las proyecciones (modelización futura)

En general, existe un consenso en las proyecciones del CMIP5 que muestran un descenso en la precipitación anual media, pero las proyecciones en las lluvias máximas diarias son ambiguas y presentan un mayor grado de incertidumbre.

En concreto, se observa una tendencia significativa de las lluvias de invierno con un aumento de extremos (5-25%) en las zonas baja y media de las cuencas del Duero y Tajo, y en el suroeste de la Península (cuencas del Tinto y Odiel), y noroeste (sector Este de la cuenca del Ebro). Estos cambios son más evidentes para el escenario de emisión RCP 8.5 que para el RCP 4.5. En los meses de verano los cambios en las precipitaciones extremas son menores (-15 y +15) y escasamente significativos, presentándose en el caso del escenario RCP 8.5 una tendencia a disminuir en la costa mediterránea y noroeste de la Península.

En relación a los caudales máximos en España, existe una elevada incertidumbre debido a que diferentes modelos generan respuestas contradictorias. El estudio de Alfieri et al. (2015a) basado en un conjunto de 7 RCMs del proyecto EURO-CORDEX, con el escenario de emisiones RCP 8.5 y el modelo hidrológico LISFLOOD, muestra para finales del siglo XXI una tendencia a aumentar el caudal de período de retorno de 100 años en los ríos del noreste de la Península (incluido el Ebro), en el Duero alto y medio, y en la cabecera del Segura. En el río Guadiana, Júcar y afluentes del Guadalquivir se muestra una tendencia a disminuir los caudales de período de retorno de 100 años, y en ocasiones se muestran resultados de signo contrario para diferentes horizontes temporales, demostrando la elevada incertidumbre de las proyecciones hidro-climáticas.

Estos resultados deben interpretarse con cautela debido al número limitado de proyecciones climáticas, y a la incertidumbre en los parámetros hidrológicos e hidráulicos aplicados en las simulaciones. Sin duda, se requiere de estudios detallados para precisar las incertidumbres y los posibles impactos del cambio climático en las inundaciones.



## 3

## Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa

### 3. Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa

#### 3.1. Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático

La Directiva Europea 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, insta a los Estados miembros de la Unión Europea a realizar una Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (artículos 4 y 5) en cada Demarcación Hidrográfica para proporcionar una aproximación del riesgo potencial por inundación asociado a los cauces de cada Demarcación, identificando Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs).

Sobre esos cauces con riesgo, seleccionados como resultado de esta primera fase de aplicación de la Directiva, se indica la necesidad de elaborar Mapas de Peligrosidad y Mapas de Riesgo de Inundación (artículo 6) según distintos escenarios de probabilidad.

Finalmente, sobre la base de los mapas mencionados, los Estados miembros deberán establecer Planes de Gestión del Riesgo de Inundación coordinados por cada Confederación Hidrográfica (artículos 7 y 8).

Todos estos trabajos deberán actualizarse cada seis años, teniendo en cuenta específicamente los efectos o influencia del cambio climático.

La identificación de las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación debe estar basada en información disponible (datos registrados o estudios sobre la evolución a largo plazo) teniendo como mínimo (entre otros) el siguiente contenido:

- Descripciones de inundaciones significativas ocurridas en el pasado que hayan tenido impactos negativos relevantes para la población, economía y medio ambiente y que puedan volver a producirse, incluyendo detalles sobre su localización, flujos y acarreos, etc.

- Impactos del cambio climático y de desarrollo a largo plazo en la ocurrencia de inundaciones.
- Otra información disponible o que pueda resultar relevante para el Estado miembro, en temas como topografía, cursos de agua y de sus características geomorfológicas e hidrológicas, incluyendo la delimitación de las llanuras de inundación como áreas de retención natural, la efectividad de las estructuras de defensa existentes, y la posición de zonas pobladas y de actividad económica, entre otros.

Durante el primer ciclo de la implementación de la Directiva de Inundaciones, catorce de los veintiocho Estados que participan en el Grupo Europeo de Inundaciones (Working Group on Floods) han considerado los posibles efectos del cambio climático.

Principalmente basándose en los escenarios de emisión del Cuarto Informe del IPCC (AR4, Fourth Assessment Report, del año 2007), previo al último publicado (el Quinto Informe de Evaluación) y del informe “Special Report on Managing the Risks of Extreme Events” (SREX) del IPCC (2012).

En la mayor parte de los casos, el análisis de la tendencia se ha realizado a partir de los datos publicados por el IPCC en sus distintos informes de evaluación y documentos publicados.

También se han utilizado diversos programas de investigación a nivel nacional, como por ejemplo en el caso de España y los análisis realizados por el CEDEX (en 2010).

En el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones, el estudio de los posibles impactos del cambio climático sobre las inundaciones debe de adaptarse a los nuevos escenarios de emisión propuestos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

En general, existe consenso entre los distintos países sobre la elevada incertidumbre que se deriva de la dispersión de los resultados obtenidos de la modelización de clima, la evaluación estadística y la construcción de escenarios.

Algunas cuestiones que se plantearon dentro del primer ciclo de implementación de la Directiva de Inundaciones son las siguientes:

- ¿Cómo asegurar que las medidas recogidas en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación tienen en cuenta los efectos potenciales del cambio climático sobre las avenidas?
- ¿Cómo abordar el cambio climático a través de los mecanismos que integran estos Planes de Gestión y en su propia actualización?

- ¿Cómo mejorar la consistencia de la información sobre el cambio climático (es decir, reducir la incertidumbre) y cuantificar las consecuencias para diferentes sectores y usuarios finales?

La calidad de la información resulta de especial importancia a la hora de elaborar los Mapas de Peligrosidad y Riesgo, y en los planes de mitigación a nivel nacional y regional, así como para la coordinación del desarrollo de cuencas fluviales internacionales o en zonas costeras susceptibles a las inundaciones.

*Toda la información referente a la evolución del clima futuro, valorada, permitirá adoptar estrategias para la implementación de medidas que gestionen los efectos del cambio climático en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación durante el segundo ciclo de implementación de la Directiva de inundaciones y, en consecuencia, en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.*

### 3.2. Principales líneas metodológicas seguidas durante la implementación del primer ciclo de la Directiva de Inundaciones por los países participantes en el Grupo Europeo de Inundaciones

Existe una gran disparidad en la forma y medida en que los distintos países europeos han considerado los efectos del cambio climático sobre las inundaciones durante el primer ciclo de implementación de la Directiva Europea 2007/60/CE, sobre evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

Antes de iniciarse el segundo ciclo, cuando ya existe un mayor consenso para considerar el impacto del cambio climático en el proceso de evaluación del riesgo de inundación, surgió la necesidad de elaborar una encuesta que promoviera la definición de una metodología única con contenidos mínimos y su información asociada para implantarla, así como recabar el conocimiento previo que tenían los países miembros.

Este cuestionario se diseñó y completó antes de la reunión del Grupo Europeo que tuvo lugar en Bucarest en marzo de 2017.

Del análisis de la encuesta distribuida a los miembros del Grupo (28 Estados miembros), en relación con la implementación del primer ciclo de la Directiva de Inundaciones, se desprenden los siguientes resultados:

## Inundaciones y cambio climático

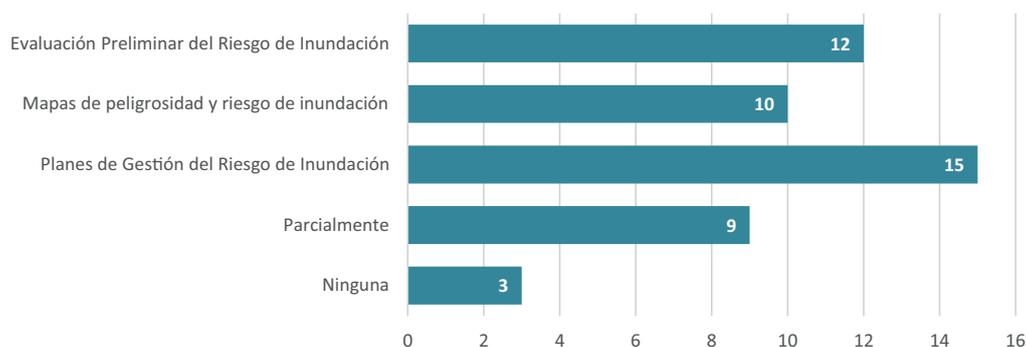
- La mayoría de los países que analizaron la influencia del cambio climático basaron su análisis en la implementación de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (53%), seguido de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (43%) y, en menor medida, en los Mapas de Peligrosidad y Riesgo (35%) (**Figura 23 y Figura 24**).
- En relación con los tipos de inundación sobre los que se analizó la influencia del cambio climático, un 78% de los países incluyeron las inundaciones fluviales, un 32% las pluviales y 15% las costeras (**Figura 25**).
- Los modelos climáticos considerados son en su mayoría Modelos Generales de Circulación atmosférica (GCMs). En menor porcentaje, Modelos Climáticos Regionales (RCMs) y en tercer lugar, Modelos Estadísticos y Dinámicos Bidimensionales (SDMS) (**Figura 26**).
- En la mayor parte de los países se utilizó información existente de publicaciones científicas.
- Sobre los escenarios de emisión usados en la implementación de los modelos climáticos, en la mayor parte de los casos se consideró un escenario de emisión medio, principalmente el A1B.

**Figura 23.-** Países que han analizado la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación. Fuente: Radulescu, 2017



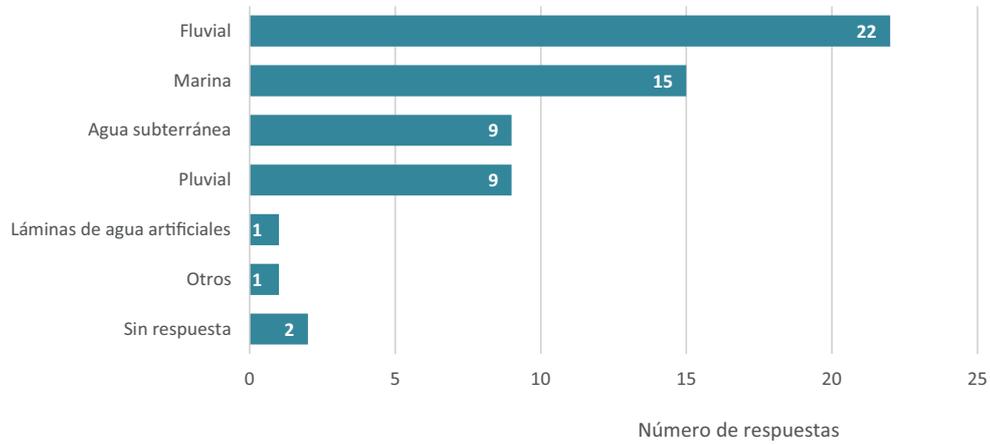
**Figura 24.-** Fases de la Directiva de Inundaciones en las que se analizó la influencia del cambio climático según la información facilitada por los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017.

¿En qué fases de la Directiva de Inundaciones se consideró el cambio climático?



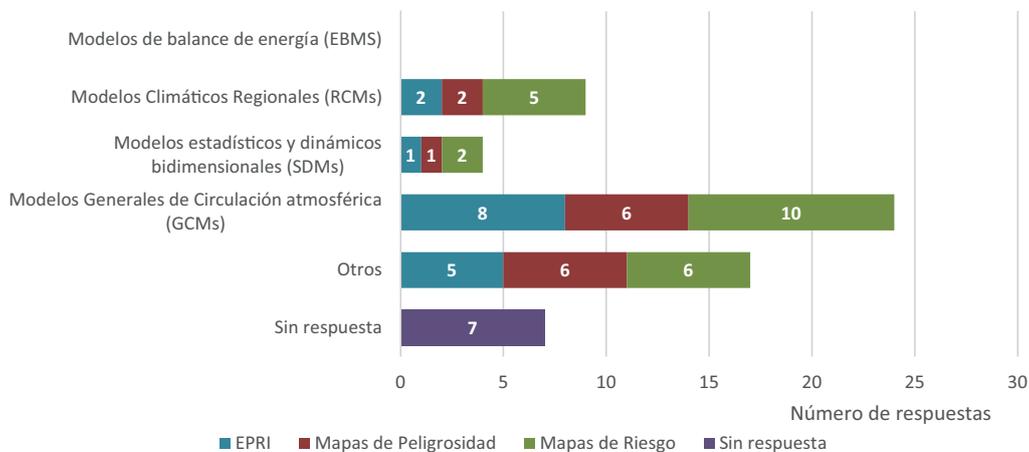
**Figura 25.-** Tipos de inundación considerados por los Estados miembros al evaluar el impacto del cambio climático. Fuente: EWGF, 2017.

A la hora de evaluar los impactos del cambio climático, ¿qué tipos de inundación se tuvieron en cuenta?



**Figura 26.-** Tipos de modelos climáticos considerados por los Estados miembros al evaluar el impacto del cambio climático. Fuente: EWGF, 2017.

¿Qué tipos de modelos climáticos se han utilizado para evaluar el impacto del cambio climático?



Los estudios más detallados se realizaron en Finlandia, donde se utilizaron 20 modelos para un escenario de emisión medio A1B.

Irlanda considera que el propósito de los modelos climáticos no es diseñar medidas para un proyecto específico, sino testar la sensibilidad del riesgo al cambio y planificar una gestión adaptativa eficiente.

- El horizonte temporal aplicado se corresponde en su mayoría al 2071-2100 (29%), seguidos del 2010-2040 (22%) y en menor medida al 2041-2070 (20%), aunque las variaciones de porcentaje son mínimas (**Figura 27**).

Otros escenarios usados han sido los siguientes: 2030-2100, 2021-2050, el horizonte temporal 2080, 2100 como año de proyección, o el peor de los escenarios.

- Un 40% de los países no ha representado zonas de inundación potenciales debidas al cambio climático. Un 28% han elaborado mapas de riesgo teniendo en cuenta diferentes escenarios (**Figura 28**).
- La valoración de la incertidumbre de los resultados se ha centrado en los modelos de clima, y principalmente mediante la comparación del periodo de control con los resultados observados en las precipitaciones máximas diarias (**Figura 29**).

Figura 27.- Intervalos temporales considerados por los Estados miembros al evaluar el impacto del cambio climático, según las respuestas de los Estados Miembros. Fuente: EWGF, 2017.

¿Qué intervalos temporales fueron considerados para evaluar el impacto del cambio climático?

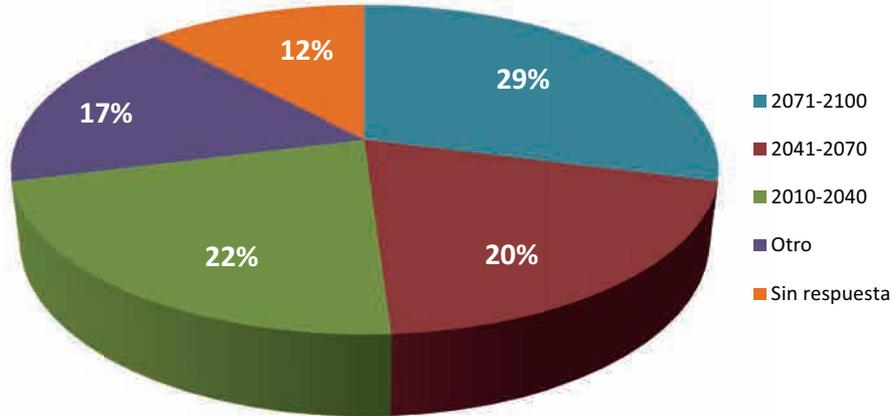


Figura 28.- Incorporación de la información relativa a cambio climático en los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación, según las respuestas de los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017.

¿Cómo se incorporó la información relacionada con el cambio climático a los mapas de peligrosidad?

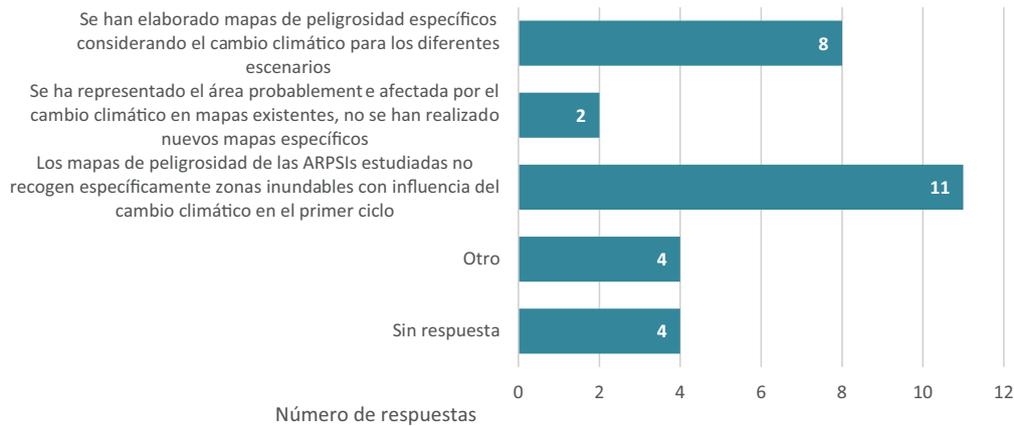
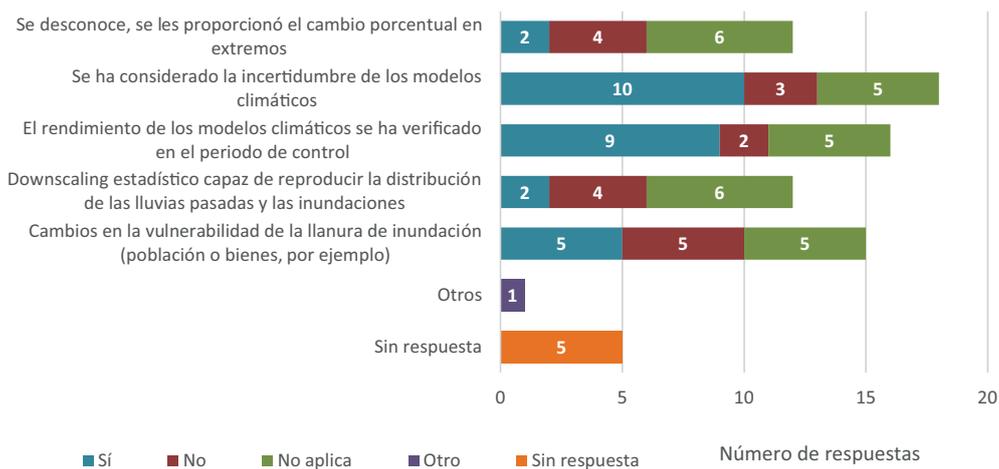


Figura 29.- Forma de valoración de la incertidumbre considerada por los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017.

¿Cómo se ha estudiado la incertidumbre de las proyecciones de inundaciones futuras?



### 3.3. Resultado de la implementación de la Directiva de Inundaciones en los países participantes en el Grupo Europeo de Inundaciones

A pesar del consenso generalizado a la hora de considerar la influencia y los efectos del cambio climático en el análisis de dicha peligrosidad y riesgo, su implementación efectiva resulta complicada por las incertidumbres sobre las tendencias de las precipitaciones extremas que se derivan de los modelos climáticos.

Desde el año 2009, el Grupo Europeo de Trabajo sobre Inundaciones ha celebrado tres reuniones para analizar los efectos del cambio climático en las avenidas y la forma óptima de incorporar esta información: Karlstad (Suecia, 2009), Bruselas (Bélgica, 2012) y Bucarest (Hungría, 2017). Entre las principales recomendaciones y conclusiones extraídas:

- En aquellas regiones con elevado grado de incertidumbre, se aconseja la utilización de modelos empíricos y el uso de reglas simples basadas en la observación, el conocimiento y la experiencia previa.
- Para poder anticipar cambios en las tendencias y patrones de inundación, es necesario recopilar información sobre inundaciones pasadas y monitorear los cambios.
- Es conveniente utilizar bases de datos de calidad (homogeneizando las series temporales y eliminando sesgos), incorporando los datos de paleoinundaciones y otros registros pre-instrumentales.
- Actualización de los mapas cada 6 años para incorporar la nueva información sobre cambio climático y su incertidumbre.
- Es necesario implementar métodos para la adaptación al cambio climático, incorporándolo en el planeamiento estructural (aumento de resiliencia de edificaciones, ampliación del Dominio Público Hidráulico o uso de materiales resistentes, etc.)
- También es necesario mejorar los sistemas de alerta temprana y la coordinación a distintos niveles.

Como se ha mencionado, de acuerdo con la Directiva, el impacto del cambio climático se debe de tener en cuenta, en la medida de lo posible, en la fase de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación y en la elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación.

En la práctica y como consecuencia de la elevada incertidumbre en las tendencias de las precipitaciones extremas en relación con el cambio climático, este análisis no se ha trasladado a los Mapas de Peligrosidad y Riesgo, excepto en Alemania, Suecia, Finlandia y Reino Unido, entre otros, donde sí se han elaborado estos mapas. La metodología y los escenarios de cambio utilizados varían entre países, no son comunes.

Del análisis de la documentación disponible sobre el tipo y grado de análisis realizado por parte de cada Estado miembro (European Commission, 2015), se extrae la siguiente información por países:

**Alemania (DE):** La evaluación de la vulnerabilidad de las cuencas fluviales y de las zonas costeras, así como la valoración del aumento potencial del riesgo de inundación, se ha estimado a partir de modelos climáticos e hidrológicos. Además, también se han considerado los posibles efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Austria (AT):** La vulnerabilidad de las cuencas fluviales al cambio climático se ha estimado usando información de modelos numéricos, tanto hidrometeorológicos como de clima. De esta forma se ha estimado el incremento potencial en el riesgo de inundación. Los efectos del cambio climático se han estimado utilizando datos procedentes de la planificación espacial y del conocimiento experto.

**Bélgica (BE):** No se han analizado los posibles impactos del cambio climático ni se han considerado las políticas de planificación espacial, como los desarrollos de usos del suelo e infraestructuras.

**Bulgaria (BG):** El impacto del cambio climático en el riesgo de inundación no se ha estudiado en detalle, aunque se tiene intención en el segundo ciclo de la Directiva de generar datos de extremos de lluvia y caudal, que servirán para la modelización en las ARPSIs delimitadas.

**Chipre (CY):** El estudio de la influencia del cambio climático en las avenidas extremas se ha basado en investigaciones tanto nacionales como internacionales y se han considerado los posibles efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio (como las relativas al uso del suelo y al desarrollo de infraestructuras).

**Croacia (HR):** El impacto del cambio climático no se ha tenido en cuenta. Al contrario que en otros países, tampoco se han considerado los potenciales efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio, como las relativas al uso del suelo y al desarrollo de infraestructuras.

**Dinamarca (DK):** Los efectos del cambio climático sobre las inundaciones costeras se identificaron a partir de una metodología que incorpora tanto las inundaciones históricas marinas como las predicciones del cambio climático. En el caso de las inundaciones fluviales, solo se tiene constancia de una inundación histórica significativa, por lo que el método para identificar futuras inundaciones se ha basado en las características de la cuenca y el daño potencial.

Aparte, han elaborado mapas de probabilidad media para inundaciones fluviales y costeras, considerando tres escenarios futuros de cambio climático. En las inun-



daciones costeras, se ha considerado un incremento de 30 cm en el nivel del mar para los próximos 50 años (para el año 2060).

No se han considerado los cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas como consecuencia del cambio climático ni se han tenido en cuenta los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Eslovaquia (SK):** En este país también se ha evaluado la vulnerabilidad de las cuencas fluviales al cambio climático. En particular, se han analizado pequeñas cuencas de montaña, donde se han tenido en cuenta criterios climáticos y geomorfológicos. Al igual que en otros países, también se han considerado los potenciales efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Eslovenia (SI):** Como consecuencia de no disponer de evidencias lo suficientemente robustas, no se han considerado los impactos del cambio climático sobre las avenidas. Sin embargo, para el segundo ciclo de aplicación de la Directiva, sí se tendrán en cuenta modelos regionales de clima y los cambios de los extremos de lluvia.

Tampoco se han estudiado los efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio, aunque se están incorporando medidas de protección a través de una nueva normativa sobre condiciones y limitaciones de construcciones y actividades.

**España (ES):** Durante el primer ciclo de implantación de la Directiva no se han considerado los efectos del cambio climático. El análisis de la tendencia de lluvias extremas en base a escenarios de clima del AR4 no ha sido concluyente y se considera que existe un elevado grado de incertidumbre sobre el impacto que tendrá el cambio climático en el futuro (CEDEX, 2010).

**Estonia (EE):** Como consecuencia de los estudios realizados en este país, se han detectado evidencias de un aumento de la temperatura media entre los meses de enero y mayo, provocando una disminución de la acumulación de nieve y hielo (Nilson et al., 2003). Esto podría llevar asociado una reducción del riesgo de inundación de ríos. Sin embargo, también se considera que aumentará la frecuencia de las tormentas extremas, por lo que las fuertes lluvias asociadas podrían suponer, por otro lado, un aumento del riesgo de inundación. Esta información no se ha implementado dentro de los Mapas de Peligrosidad y riesgo. Solamente se han incluido los cambios previstos en el nivel del mar (Kont et al., 2003), de acuerdo a los datos suministrados por el Cuarto informe del IPCC.

**Finlandia (FI):** Como resultado de sus estudios, se espera que la temperatura aumente entre 3-7°C y que la precipitación aumente entre un 13-26% a finales del siglo XXI, con un incremento asociado en las lluvias extremas,

particularmente en verano. El impacto del cambio climático en las inundaciones fluviales ha sido estimado a partir de modelos climáticos e hidrológicos. Igualmente, se han considerado los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio, uso del suelo y del desarrollo de infraestructuras.

**Francia (FR):** En Francia se han incorporado los potenciales impactos del cambio climático hacia el año 2100, suponiendo 1 metro de subida del nivel del mar, que se corresponde con el peor de los escenarios. No se ha abordado el impacto del cambio climático en las cuencas fluviales. También se han considerado los potenciales efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Grecia (EL):** En Grecia no se han estudiado los efectos del cambio climático, ya que los datos existentes no se han considerado suficientes para una proyección informada del efecto del cambio climático sobre la frecuencia de las avenidas. Tampoco se han considerado los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Hungría (HU):** La Estrategia Nacional de Cambio climático de Hungría ha definido una serie de escenarios (emisiones altas y bajas) basados en los datos publicados por el IPCC en su Quinto Informe, los cuales serán analizados en el futuro, durante el segundo ciclo de aplicación. Los datos existentes apuntan hacia una disminución de la precipitación total anual, pero también a un incremento de las lluvias torrenciales, que llevarán asociado un aumento del riesgo de inundación.

Los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio se han considerado en base a políticas de reforestación y cambio en la normativa del diseño de infraestructuras.

**Irlanda (IE):** En Irlanda, la información para analizar los posibles efectos del cambio climático no estaba disponible en el momento de la elaboración de la cartografía de las avenidas, durante el primer ciclo. Durante el segundo, se desarrollará una metodología basada en las proyecciones de clima, y en modelos hidrológicos. Los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio no se han considerado.

**Italia (IT):** En este país se menciona el cambio climático en relación con la primera fase de la Directiva, es decir, en el desarrollo de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación con la correspondiente identificación de las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación. En la actualidad, no se dispone de datos hidrológicos suficientes como para generar escenarios de cambio climático que permitan determinar las posibles consecuencias futuras, por lo que se ha aconsejado a las autoridades que evalúen el problema y consideren

la posible labor futura en este ámbito. Tampoco se han considerado los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Letonia (LV):** En base a los datos del Cuarto Informe del IPCC, se ha evaluado la vulnerabilidad de las cuencas fluviales y de las aguas costeras al cambio climático, pero no se esperan cambios significativos en las inundaciones en el futuro próximo. Sí se espera que las tormentas aumenten su frecuencia en el mar Báltico y posiblemente provoquen un aumento del nivel del mar durante las tormentas, pero no cambios significativos en los ríos. No se han tenido en cuenta los potenciales efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Lituania (LT):** Para evaluar la vulnerabilidad de las cuencas fluviales y las aguas costeras con respecto al cambio climático, se han utilizado modelos climáticos que consideran 40 escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y el análisis del impacto de la ocurrencia de futuras inundaciones potenciales significativas.

El análisis de los datos históricos mostró una tendencia significativa decreciente de los caudales máximos de los ríos durante los meses de primavera, verano y otoño y tendencias significativamente al alza de estos caudales durante el invierno. También se prevé un aumento de la frecuencia de las precipitaciones extremas, lo que representa el 15% de las inundaciones históricas analizadas, y un aumento durante el invierno del nivel medio del mar en el Báltico de hasta 100 centímetros para el año 2100.

Con respecto a los potenciales efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio, no se han considerado.

**Luxemburgo (LU):** No se han tenido en cuenta aún los efectos del cambio climático en el riesgo de inundación, al no haber suficiente información disponible, pero sí se pretenden incluir para el segundo ciclo de la Directiva los resultados obtenidos por diversos estudios recientes y en curso (e.g. Georgen et al., 2013). Al igual que en otros países, no se han tenido en cuenta los efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Malta (MT):** No existe información sobre las proyecciones climáticas y posibles consecuencias del cambio climático en las avenidas. No se han valorado los efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Países Bajos (NL):** El estudio de la influencia del cambio climático sobre el riesgo de inundación no fue abordado durante el primer ciclo, ni se identificaron los posibles efectos sobre este riesgo de las políticas de ordenación del territorio.

**Polonia (PL):** En Polonia, no se consideró el impacto del cambio climático sobre el riesgo de inundación fluvial por falta de datos, pero sí se incluyó la valoración de la influencia sobre zonas costeras, en base a los escenarios de aumento del nivel del mar del Cuarto Informe del IPCC. Los posibles efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio sólo se han incluido como punto de partida para el análisis.

**Portugal (PT):** No se ha estudiado el efecto del cambio climático en el riesgo de inundación ni se ha abordado el análisis de los posibles efectos sobre el riesgo de las políticas de ordenación del territorio.

**Reino Unido (UK):** En el Reino Unido, se han publicado diferentes informes de valoración del cambio climático sobre las inundaciones (Sayers et al., 2017). En estos informes, se publican los porcentajes de cambio en las lluvias extremas según las distintas cuencas hidrográficas, los cuales se aplican sobre modelos hidrológicos para determinar los cambios en las zonas inundadas para diferentes periodos de retorno.

Cada territorio del Reino Unido ha elaborado los Mapas de Peligrosidad y Riesgo por inundación (en ARPSIs fluviales, pluviales y costeras) en relación con el cambio climático. Específicamente, en Gibraltar se han evaluado los efectos del cambio climático en los niveles del mar en relación con las defensas marinas existentes y previstas. Los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio se han considerado en todo el territorio (Inglaterra, Gales, Irlanda del Norte y Escocia).

**República Checa (CZ):** Para estimar la variación potencial del riesgo de inundación y evaluar la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas, se utilizaron modelos específicos. También se han considerado los posibles efectos sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio.

**Rumania (RO):** No han evaluado la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas ni de las zonas costeras al no estar probados los efectos del cambio climático sobre la ocurrencia y magnitud de las inundaciones en sus cuencas hidrográficas. Los efectos potenciales sobre el riesgo de inundación de las políticas de ordenación del territorio no fueron considerados.

**Suecia (SE):** Los posibles impactos detectados por este país tras su análisis de la influencia del cambio climático se han incluido en Mapas de Peligrosidad, para un periodo de retorno de 100 años. Han empleado datos de modelos regionales de clima del Cuarto Informe del IPCC y han analizado la variación de los extremos mediante modelos de precipitación-escorrentía.



A continuación se recogen diversos mapas de inundación elaborados por algunos de los países que han incorporado la influencia del cambio climático en los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación.

Los mapas de la **Figura 30** y **Figura 31** son ejemplos de los elaborados por Suecia, para la localidad de Edsbyn, con inundaciones de distinto periodo de retorno correspondientes al río Voxnan. Algunas de las hipótesis consideradas llevan implícitas la influencia del cambio climático.

**Tabla 8.- Consideración del cambio climático y de tendencias a largo plazo de indicadores de cambio ambiental, por parte de países miembros de la UE dentro de la Directiva de Inundaciones (en la fase de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI)). Los países están listados según la abreviatura oficial de la UE. Fuente: European Commission, 2015**

	Cambio climático	Desarrollo urbanístico	Desarrollo de infraestructuras	Desarrollo socio-económico
AT				
BE	Directiva: Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI) no realizada			
BG				
CY				
CZ				
DE				
DK				
EE				
EL				
ES				
FI				
FR				
HR				
HU				
IE				
IT	Directiva: Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI) no realizada			
LT				
LU	Directiva: Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI) no realizada			
LV				
MT				
NL	Directiva: Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI) no realizada			
PL				
PT	Directiva: Evaluación Preliminar del Riesgo (EPRI) no realizada			
RO				
SE				
SI				
SK				
UK				

 Considerada la tendencia a largo plazo

 No considerada la tendencia a largo plazo

 Sin información

Tabla 9.- Consideración de diferentes métodos, modelos y escenarios por parte de los Estados Miembros de la UE para la generación de mapas de inundación durante el primer ciclo de implementación de la Directiva de Inundaciones. S: Método o modelo considerado. N: Método o modelo no considerado. Los países están listados según la abreviatura oficial de la UE. Fuente: European Commission, 2015.

	Cambio climático considerado	Tendencias basadas en investigación Internacional	Tendencias basadas en investigación nacional	Peligrosidad basada en modelos de clima	Peligrosidad con datos históricos lluvia-caudal	Peligrosidad basada en estadística de datos climáticos
AT	S	S	S	S	S	S
BE	N	N	N	N	S	S
BG	SIN INFORMACION					
CY	S	S	N	N	S	N
CZ	S	N	S	N	S	S
DE	S	N	N	N	S	S
DK	S	S	S	S	S	S
EE	N	N	N	N	N	N
EL	SIN INFORMACION					
ES	N	N	N	N	N	N
FI	S	S	S	S	S	S
FR	S	N	S	N	S	N
HR	SIN INFORMACION					
HU	N	N	N	N	N	N
IE	N	N	N	N	N	N
IT	N	N	N	N	N	N
LT	S	S	S	N	N	S
LU	N	N	N	N	N	N
LV	N	N	N	N	N	N
MT	SIN INFORMACION					
NL	N	N	N	N	N	N
PL	N	N	N	N	N	N
PT	N	N	N	N	N	N
RO	N	N	N	N	N	N
SE	S	S	S	S	S	S
SI	N	N	N	N	N	N
SK	S	N	S	N	S	S
UK	S	N	S	N	S	N

## Inundaciones y cambio climático

En el mapa de la **Figura 30** se muestran los calados para un periodo de retorno de 100 años, recogándose en tono azul más claro las superficies normalmente ocu-

padas por el agua y en una gradación de azul, las categorías en que se clasifican los calados a medida que aumenta la profundidad del agua.

**Figura 30.-** Ejemplo de mapa de peligrosidad con cambio climático correspondiente a un periodo de retorno de 100 años en Edsbyn, Suecia. Fuente: <https://www.msb.se>

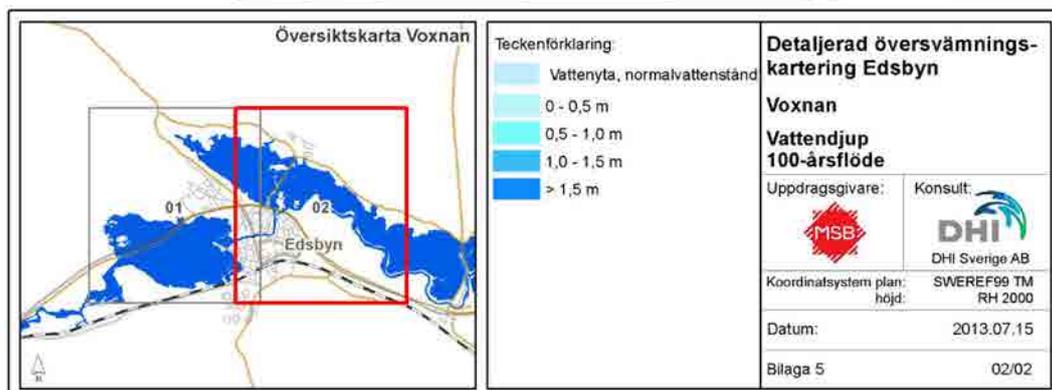
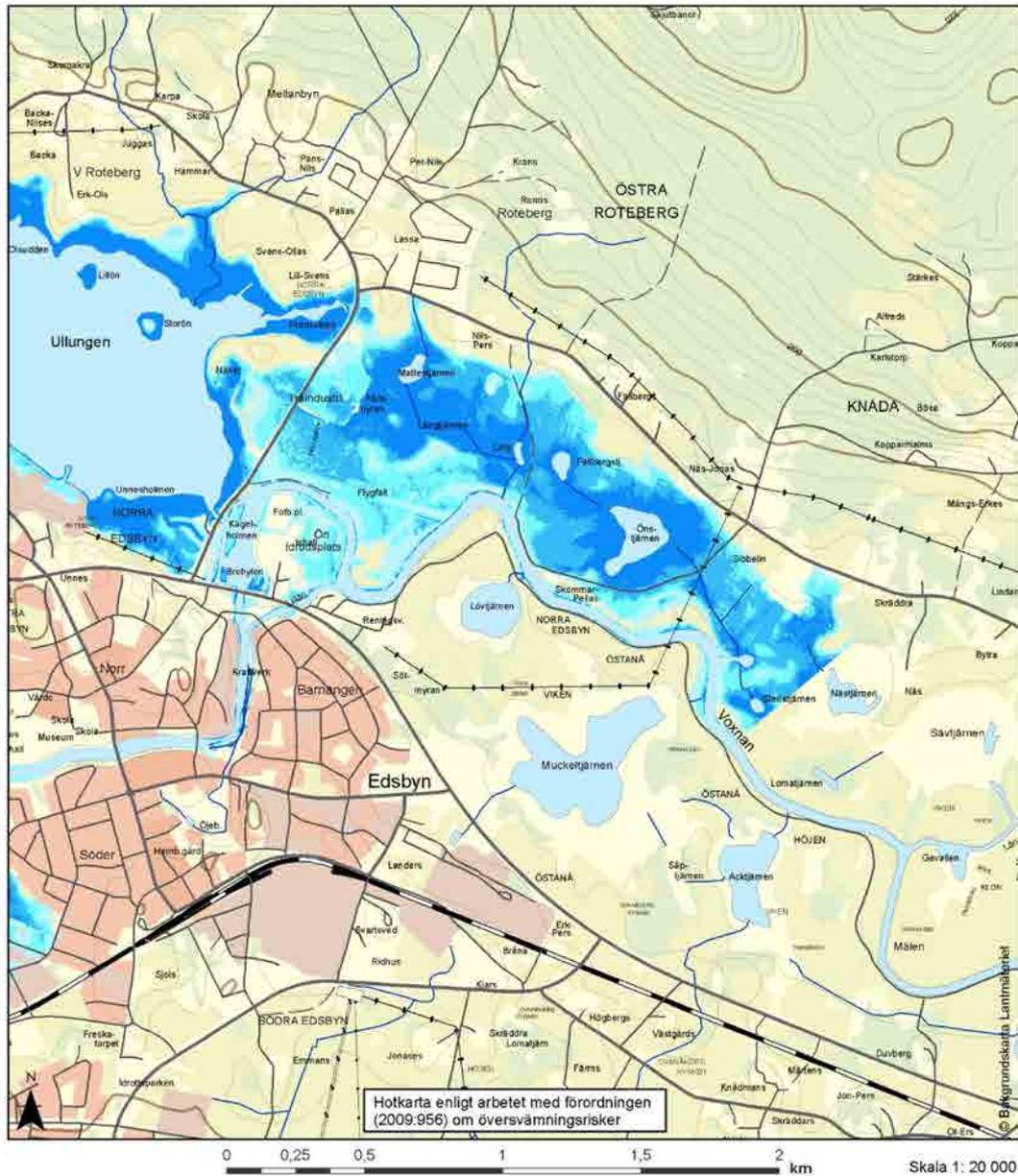
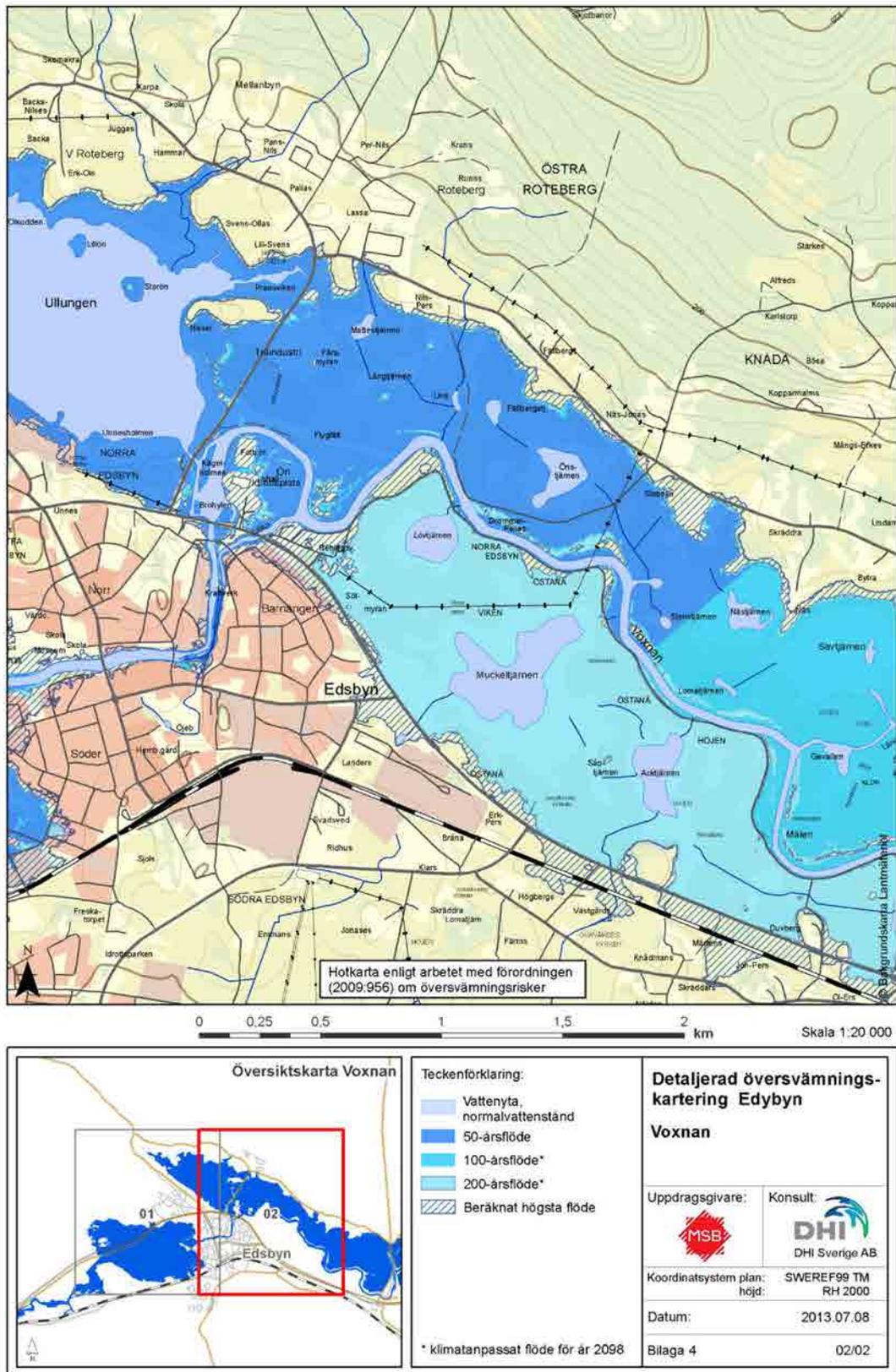


Figura 31.- Ejemplo de mapa de zonas inundables con cambio climático para distintos periodos de retorno en Edsbyn, Suecia. Fuente: <https://www.msb.se>



En el mapa de la **Figura 31**, se muestran las zonas inundables asociadas a distintos periodos de retorno, algunas de ellas considerando la hipótesis del cambio climático,

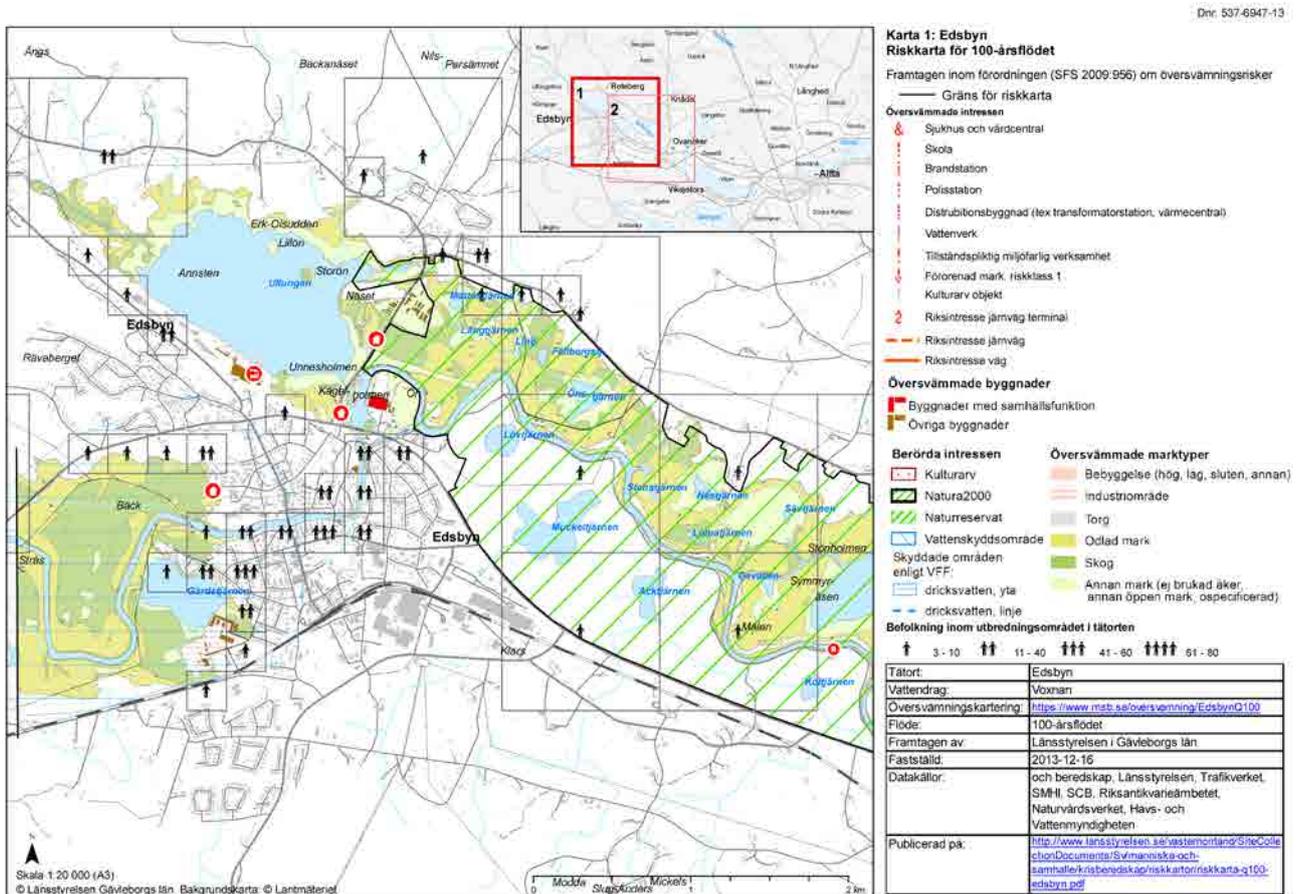
tal y como se especifica en la siguiente traducción de la leyenda:

## Inundaciones y cambio climático

●	■	Vattenyta, normalvattenstånd	Superficies normalmente ocupadas por el agua.	●
●	■	50-årsflöde	Inundación asociada a un periodo de retorno de 50 años.	●
●	■	100-årsflöde*	Inundación asociada a un periodo de retorno de 100 años, considerando el cambio climático para el año 2098.	●
●	■	200-årsflöde*	Inundación asociada a un periodo de retorno de 200 años, considerando el cambio climático para el año 2098.	●
●	■	Beräknat högsta flöde	Flujo máximo estimado.	●

También se incluye un ejemplo de mapa de riesgo elaborado por Suecia.

Figura 32.- Ejemplo de mapa de riesgo de inundación de Edsbyn, Suecia. Fuente: <http://www.lansstyrelsen.se/vasternorrland/Sv/Pages/default.aspx>



En el Reino Unido, Irlanda del Norte ha realizado estudios para determinar la influencia del cambio climático. La imagen que se muestra a continuación se corresponde con un mapa de peligrosidad de inundación en una zona de la ciudad de Belfast, descargable a través de su visor web. En este mapa se pueden observar distintas manchas de inundación en función del periodo de retorno estudiado (en el mapa, mencionado en términos de escenarios de probabilidad).

Además, en este visor se pueden consultar las manchas de inundación asociadas a distintos escenarios de

cambio climático (no se encuentran para descarga, sólo consulta).

En la **Figura 34**, se aprecian dos zonas inundables diferenciadas, según la hipótesis de cálculo. En azul oscuro se muestran las zonas afectadas por la avenida en clima actual y en azul más claro, las zonas afectadas como consecuencia de considerar el cambio climático. No se especifica el periodo de retorno ni el horizonte temporal.

Figura 33.- Ejemplo de mapa de peligrosidad de Belfast (Irlanda del Norte, Reino Unido). Fuente: Rivers Agency

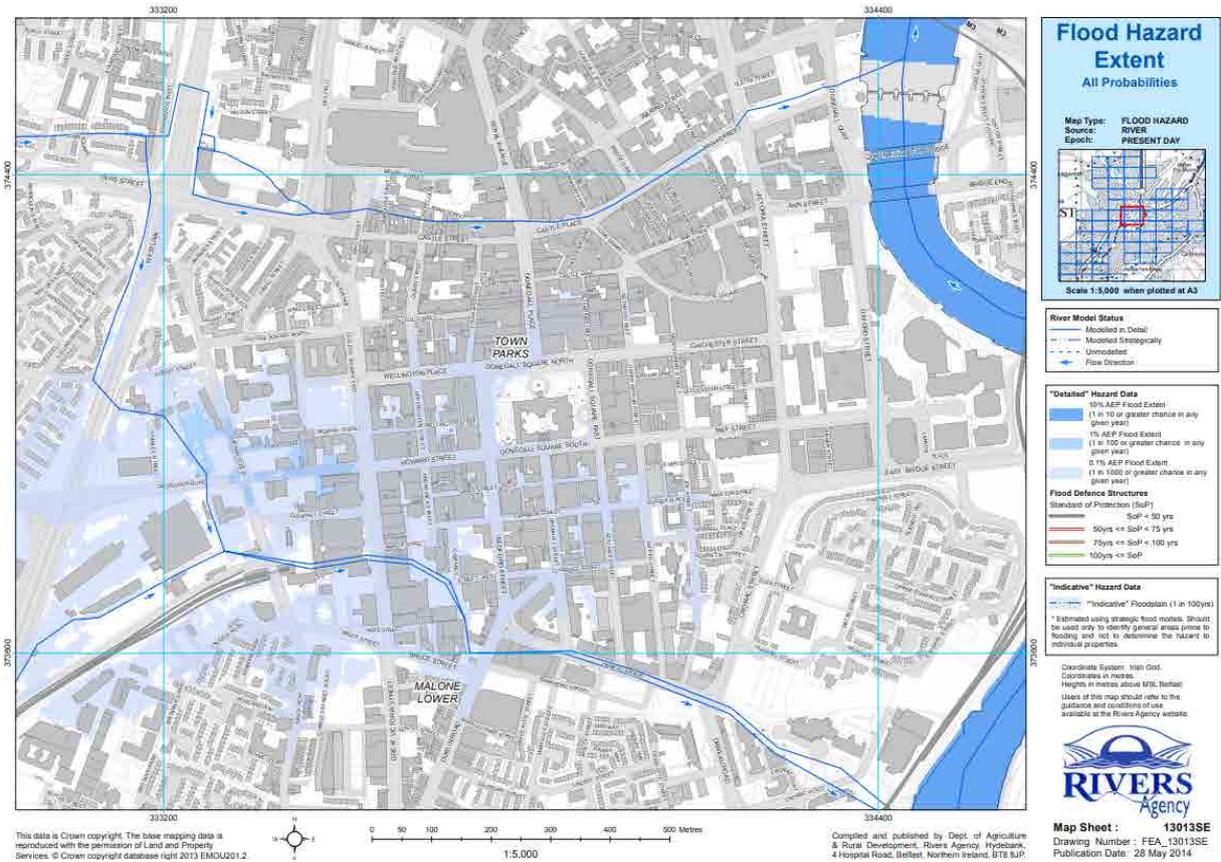
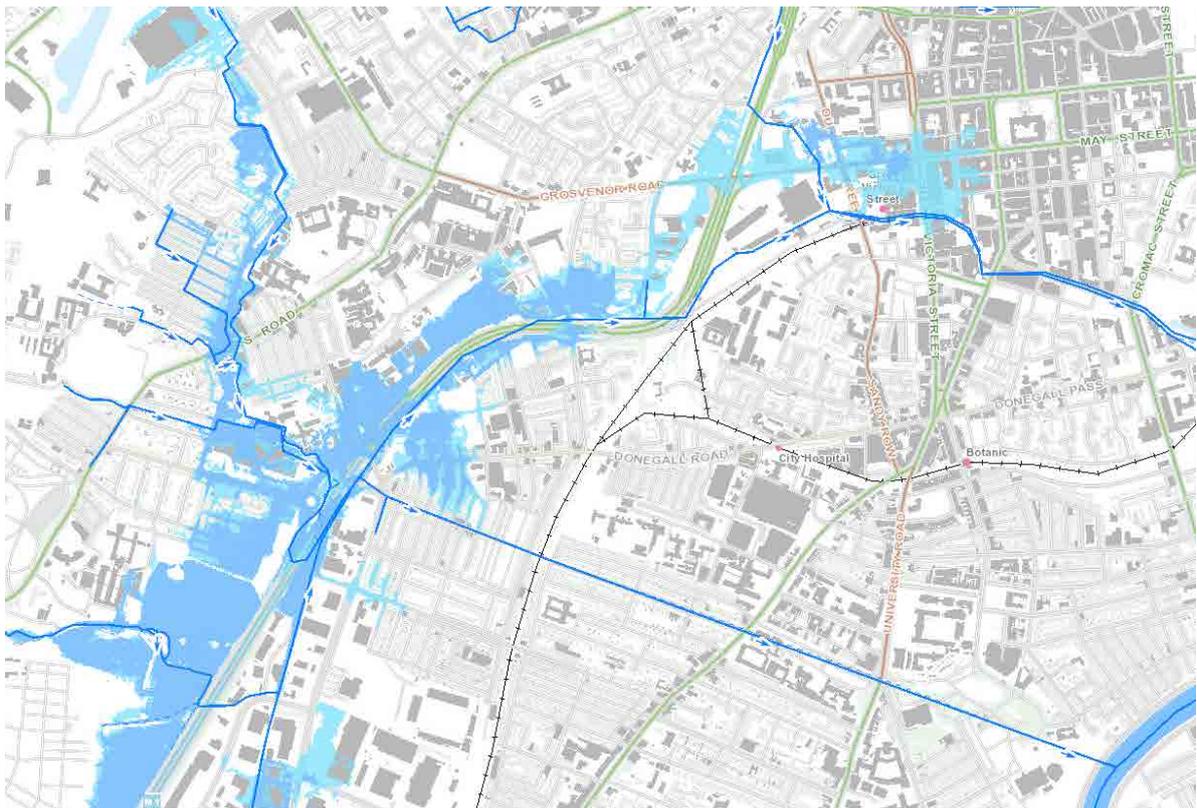


Figura 34.- Ejemplo de distintos escenarios de peligrosidad (con cambio climático y sin cambio climático) para la ciudad de Belfast (Irlanda del Norte, Reino Unido). Fuente: Visor web de zonas inundables de Irlanda del Norte, Reino Unido



### 3.4. Principales líneas metodológicas de inclusión del cambio climático en el segundo ciclo de implantación de la Directiva de Inundaciones

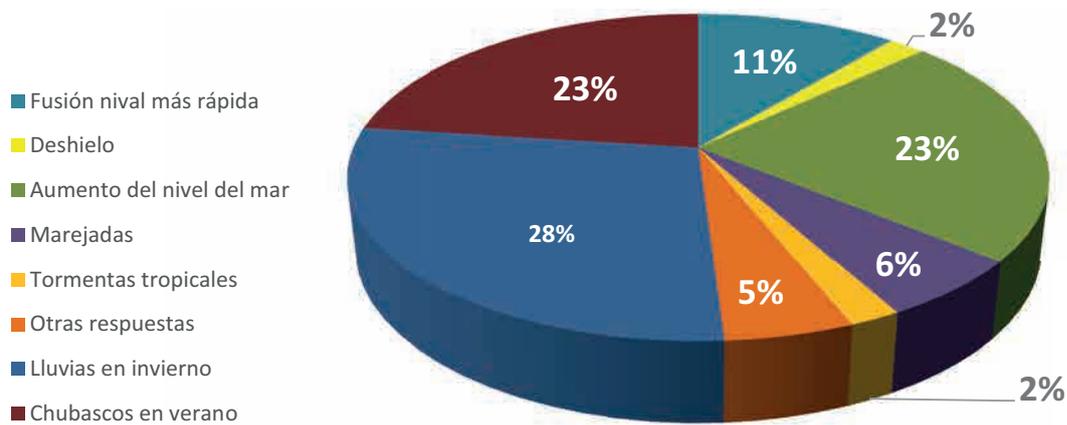
Los patrones meteorológicos que parecen evidenciar modificaciones en relación con el cambio climático y pueden suponer un aumento en el riesgo de inundación (**Figura 35**), se corresponden, en opinión de un 28% de los miembros del Grupo de Trabajo, con las lluvias de

invierno. Por otro lado, un 23% apuntan al aumento de las lluvias intensas de verano, y un 23% al aumento del nivel del mar.

Los tipos de inundación que presentan una mayor demanda para el estudio por su relación con el cambio climático y su repercusión (**Figura 36**), son las inundaciones fluviales (33% de las respuestas), las pluviales (27% de las respuestas) y las debidas al ascenso del nivel del mar (23% de las respuestas).

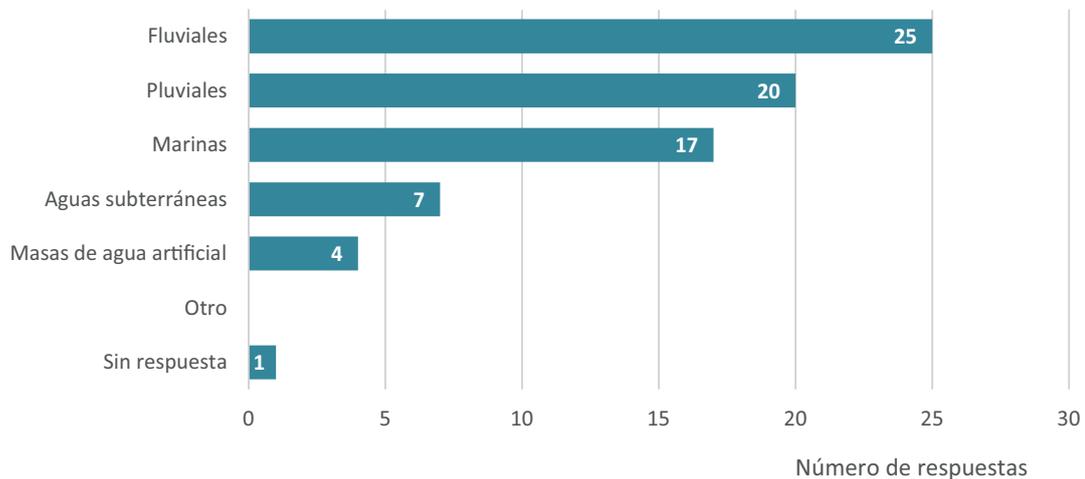
**Figura 35.-** Patrones meteorológicos que parecen encontrarse influenciados por el cambio climático, según las respuestas de los Estados miembros. Fuente: Radulescu, 2017.

¿Se han detectado cambios en los patrones meteorológicos como consecuencia del cambio climático como para suponer un aumento del riesgo de inundación?



**Figura 36.-** Tipos de inundación que se van a tener en cuenta al evaluar los impactos de cambio climático. Fuente: EWGF, 2017.

¿Qué tipos de inundación se van a tener en cuenta para evaluar los impactos del cambio climático?



### Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa

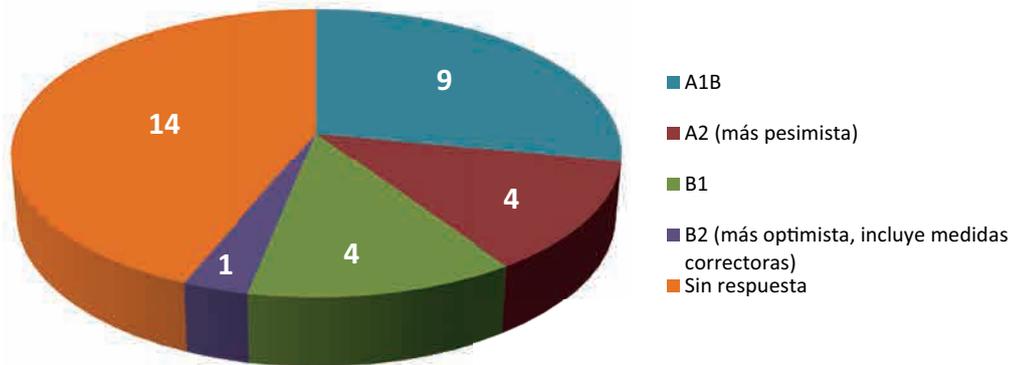
En relación con los escenarios de emisión que deberían de considerarse, existe bastante desconocimiento sobre la materia, dominando la falta de respuestas. De las respuestas, domina el escenario del CMIP5 con aumento de emisiones intermedio A1B (9 respuestas), mientras que las emisiones más pe-

simistas A2 y optimistas B2 obtienen 4 respuestas cada una (ver **Figura 37**).

Los horizontes temporales a considerar para los análisis presentan un número similar de respuestas, aunque hay mayor preferencia por el horizonte temporal más largo, 2071-2100 (ver **Figura 38**).

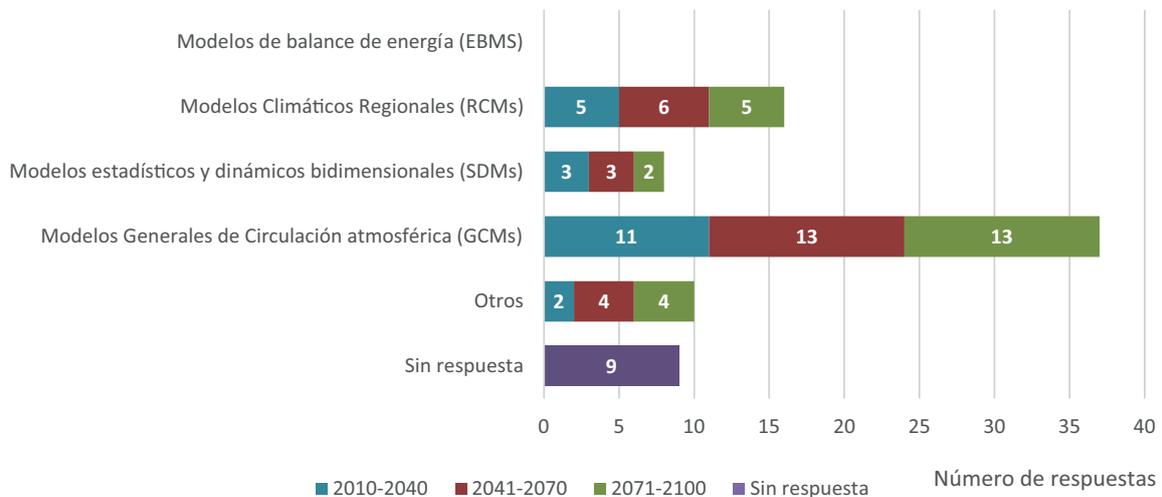
**Figura 37.-** Escenarios de emisión que los Estados miembros consideran que deben incorporarse para valorar la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación. Fuente: EWGF, 2017.

¿Qué escenarios de emisión deberían ser considerados para estudiar la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación?



**Figura 38.-** Modelos climáticos que los Estados miembros pretenden implementar en el segundo ciclo de implantación de la Directiva de Inundaciones y su escala temporal. Fuente: EWGF, 2017.

¿Qué modelos climáticos pretenden implementarse en el segundo ciclo de la Directiva de Inundaciones?





De cara al segundo ciclo de implantación de la Directiva de Inundaciones, los Estados miembros manifiestan una preferencia hacia el uso de modelos GCMs (13 respuestas), seguidos por modelos regionales RCMs (5 respuestas), y una menor preferencia de los modelos dinámicos-estadísticos SDMs (3 respuestas).

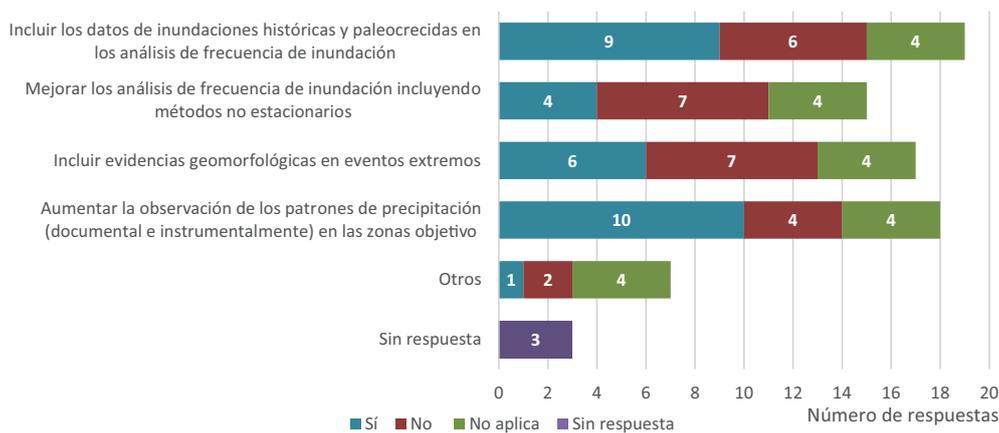
Los Estados miembros consideran que los modelos climáticos pueden utilizarse para elaborar Mapas de Peligrosidad y Riesgo, aunque se considera más factible (y en consecuencia, con menor incertidumbre) en el caso de las inundaciones costeras (14 respuestas). Se considera menos aplicable en el caso de las inundaciones pluviales y fluviales, teniendo en cuenta la variación en las leyes de frecuencia (12 respuestas).

Dadas las incertidumbres de las simulaciones climáticas, muchos de los países miembros se plantean reforzar estas proyecciones con otro tipo de datos (ver **Figura 39**).

Los tipos de información que se consideran como método alternativo o complementario incluyen los datos históricos y de paleoinundaciones incluidos en el análisis de frecuencia (19 respuestas), el análisis de registros largos de observaciones de lluvia (instrumental y documental) en zonas de interés (18 respuestas), y la mejora de las leyes de frecuencia mediante métodos no estacionarios (15 respuestas).

**Figura 39.- Estudios o enfoques complementarios y/o alternativos para reducir la incertidumbre asociada a los modelos climáticos, según las respuestas aportadas por los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017.**

¿Se plantea mejorar el conocimiento sobre cambio climático a partir de otros métodos alternativos?

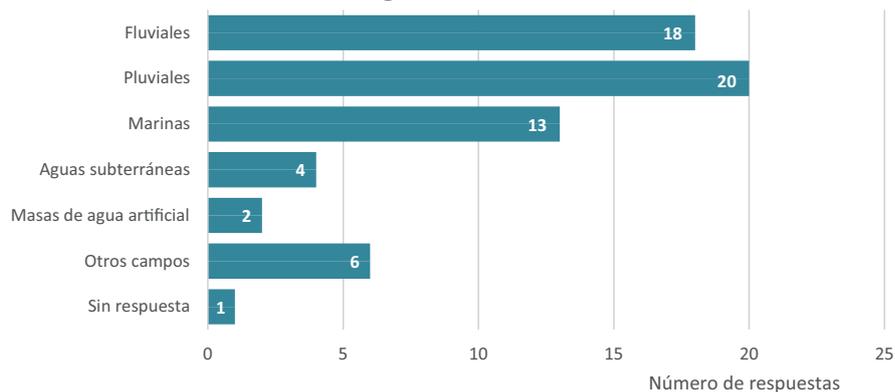


Los Estados miembros también resaltan la necesidad de aumentar la investigación en el campo de las relaciones entre inundaciones y cambio climático. Sobre todo en el

caso de las pluviales y fluviales y, en menor medida, en las marinas (**Figura 40**).

**Figura 40.- Campos en los que los Estados miembros consideran que es necesario aumentar la investigación. Fuente: EWGF, 2017.**

¿En qué campos se considera que es necesario aumentar la investigación?



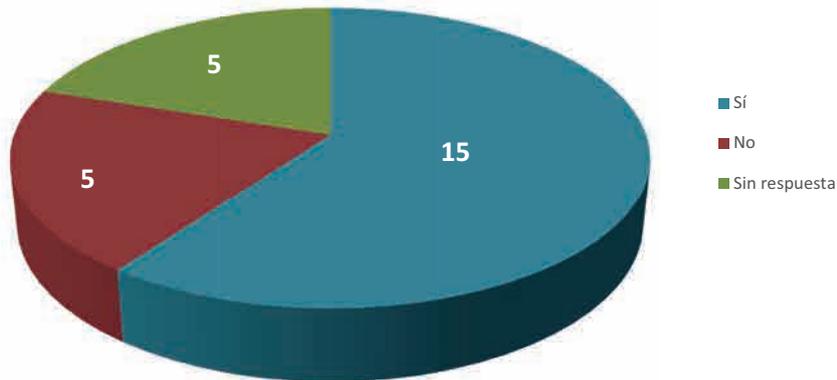
### Revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa

Preguntados sobre si se plantean una nueva valoración en la priorización de las medidas utilizadas en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs), en particular, sobre el balance entre prevención, prepara-

ción y protección, se responde afirmativamente en 15 casos, negativamente en 5 casos, mientras que en 5 casos se está considerando (**Figura 41**).

**Figura 41.-** Estados miembros que se plantean una evaluación de la priorización de las medidas de los PGRIs, según sus respuestas. Fuente: EWGF, 2017.

¿Se plantea una evaluación de la priorización de las medidas de los PGRIs?



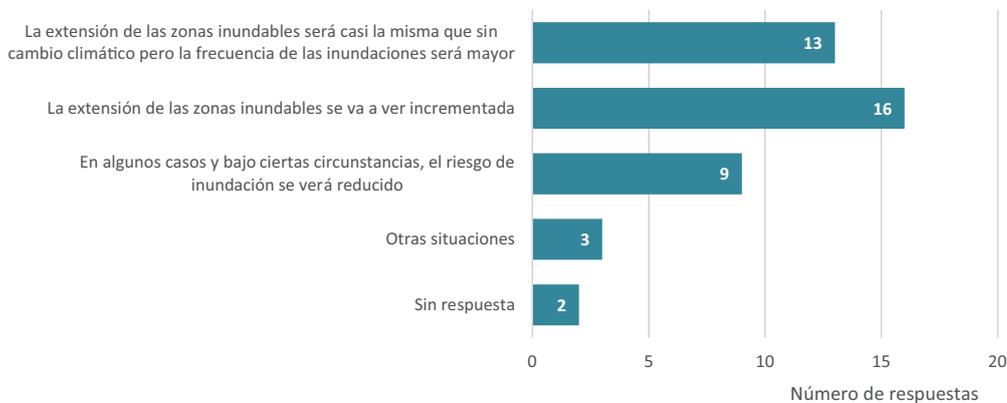
En resumen, para la revisión de las ARPSIs que se ha de acometer durante la fase de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, los Estados miembros se inclinan por la aplicación de métodos que incluyan una aproximación cuantitativa de los cambios que genera el cambio climático en la frecuencia y

magnitud de las inundaciones, y que se apoyen en una aproximación cualitativa.

Sobre la aplicación de modelos cuantitativos para el análisis de crecidas repentinas o súbitas, o para la detección de nuevas zonas de inundación existe menos consenso.

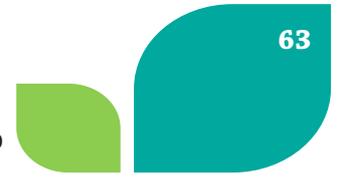
**Figura 42.-** Afecciones que los Estados miembros consideran que pueden ocurrir en las ARPSIs fluviales como consecuencia de la influencia del cambio climático. EWGF, 2017

¿Cuáles de las siguientes situaciones se considera que es probable que ocurra en un escenario de cambio climático?



Sobre cómo puede afectar el cambio climático en la extensión de las zonas inundables, la mayor parte de los Estados miembros considera que esta extensión se verá aumentada (16 respuestas), aunque también existe un número significativo de ellos que cree que la

extensión no variará sustancialmente, siendo similar a la mostrada en los mapas, pero que la frecuencia de inundación sí aumentará (13 respuestas). Sólo 9 países indican que los riesgos de inundación decrecerán en el futuro (ver **Figura 42**).



Los retos futuros en relación al cambio climático a lo largo de las tres fases que estipula la Directiva de Inundaciones (Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI), elaboración de Mapas de Peligrosidad y Mapas de Riesgo de Inundación y Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs) son:

- Gestionar de forma adecuada la incertidumbre, para entender los impactos y valorar las acciones y adaptaciones necesarias.
- Financiar la investigación de los impactos del cambio climático en cada fase de la Directiva, incluyendo metodologías y modelización del cambio climático.
- Realizar juicios expertos sobre el riesgo significativo, dada la incertidumbre de los impactos del cambio climático.
- Determinar 3 escenarios (probabilidades baja, media y alta) de acuerdo a la Directiva, para las inundaciones repentinas o súbitas y las provenientes de aguas subterráneas.
- Modelizar posibles eventos de inundación en zonas transfronterizas.
- Tomar decisiones y comunicar al público el elevado nivel de incertidumbre de los resultados del análisis del impacto del cambio climático en las inundaciones.

Las medidas de adaptación (**Figura 43**) más aceptadas incluyen el aumento de las medidas de retención natural (19 respuestas), la actualización de los niveles de diseño para los sistemas de protección, incluida la capacidad de las presas (16 respuestas) y la optimización de la explotación de los embalses, con el incremento de la retención y capacidad de mitigación (17 respuestas).

Con respecto al modo de adaptar las edificaciones y otras infraestructuras (**Figura 44**), se valoran positivamente los materiales impermeables, el construir por encima de los calados de ciertas avenidas extremas, así como colocar diques en casos excepcionales. Otras medidas incluyen restricciones a la construcción en zona inundable, fomentando la utilización de zonas elevadas.

Las medidas de adaptación más aceptadas a la hora de evitar los impactos del cambio climático (**Figura 45**) son la mejora del control de las inundaciones mediante la restauración de los ríos y el control geomorfológico (19 respuestas), la mejora de los sistemas de predicción en tiempo real de la precipitación y la adecuada gestión de las normas de explotación de embalses (21 respuestas), así como la identificación de potenciales zonas de inundación controlada para reducir el riesgo aguas abajo (como pueden ser campos, zonas deportivas, sistemas lacustres fluviales, etc.).

**Figura 43.-** Medidas de adaptación que deberían incluirse en los PGRIs por los Estados miembros, según sus respuestas. EWGF, 2017

¿Cuáles son las medidas de adaptación incluidas en los PGRIs?

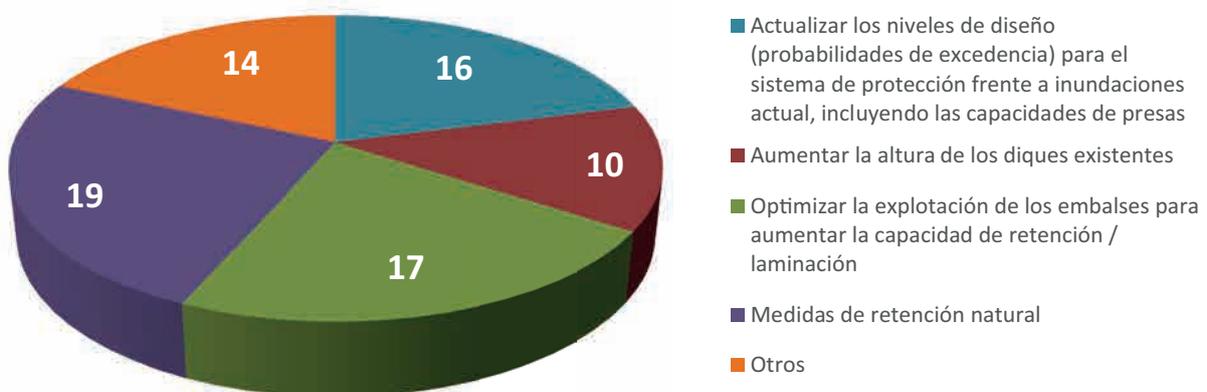


Figura 44.- Posibles medidas de adaptación de las infraestructuras y edificios según las respuestas de los Estados miembros de acuerdo a sus PGRI. EWGF, 2017

¿Cuáles son las medidas de adaptación para infraestructuras y edificios que se consideran más importantes?

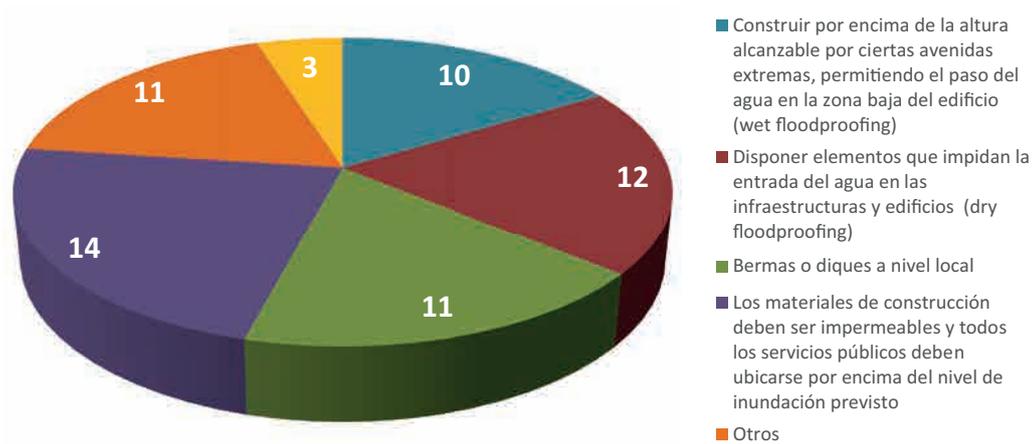
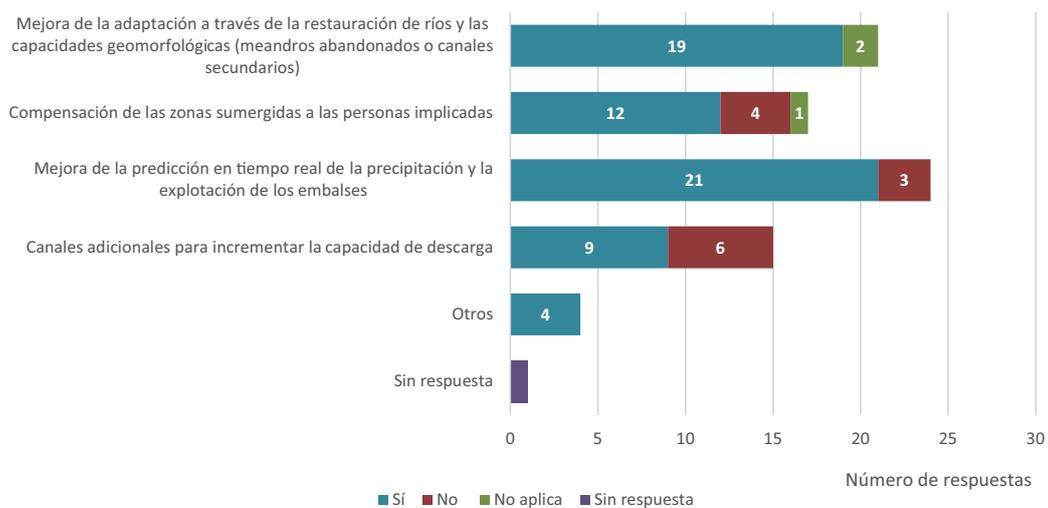


Figura 45.- Medidas de adaptación a implementar por los Estados miembros para evitar los impactos de cambio climático. EWGF, 2017

¿Cuáles son las medidas de adaptación implementadas para evitar los impactos del cambio climático?



### 3.4.1. Comentarios adicionales

Países Bajos: Dudan que se deba crear una metodología única con mínimos comunes para todos los países, con información específica, para incluir los efectos del cambio climático en la aplicación de la Directiva de Inundaciones, ya que existen grandes diferencias con respecto a la vulnerabilidad según los países.

Reino Unido: Su enfoque no considera tanto el desarrollo de la comprensión científica sino el desarrollar una gama completa de opciones y acciones específicas en los PGRI.

Irlanda: La UE debe reconocer el principio de subsidiariedad para permitir a los Estados miembros abordar el cambio climático de la manera más apropiada en su propio contexto. Por tanto, la creación de una “metodología única para Europa”, si ésta fuese prescriptiva en algún grado, podría anular las buenas prácticas a nivel nacional, y por tanto no sería apropiada, a su juicio.

Eslovaquia: Consideran importantes las mediciones en continuo de los caudales y de las precipitaciones y su uso en nuevas predicciones con mayor resolución.

## 3.5. Conclusiones de la adaptación al cambio climático por parte de Europa

Del análisis de las actividades de los Estados miembros que constituyen el Grupo de Inundaciones, y de las reuniones realizadas para abordar la implementación de los efectos del cambio climático en el riesgo de inundación, se extraen las siguientes conclusiones (dispuestas por apartados/temas):

### 3.5.1. Cambio climático e inundaciones durante el primer ciclo de la Directiva

- La mayor parte de los Estados miembros no tuvieron en cuenta el cambio climático en la delimitación de las ARPSIs, con excepción de las marinas, donde una modelización combinada con el juicio experto ha permitido la obtención de zonas inundables.
- Los principales esfuerzos para determinar el impacto del cambio climático se han centrado en las inundaciones fluviales y costeras o marinas.
- Algunos Estados miembros han desarrollado Mapas de Peligrosidad específicos considerando el cambio climático según diferentes escenarios (Suecia, Alemania o Escocia e Irlanda del Norte en el Reino Unido).
- Existen algunos Planes de Gestión del Riesgo de Inundación que describen los efectos generales del cambio climático, mientras que otros solo lo tuvieron en cuenta en la priorización de medidas o directamente no lo consideraron en el desarrollo de los planes.

- Los mayores esfuerzos en relación al cambio climático se han realizado dentro en los planes de gestión, dado que existen medidas dentro de estos planes que se efectúan independientemente de los efectos reales del cambio climático (“win to win solutions”).
- La prevención juega un papel fundamental en la adaptación al cambio climático. Los esfuerzos para la reducción de los riesgos deben de considerar el cambio climático.

### 3.5.2. Cambio climático e inundaciones durante el segundo ciclo de la Directiva

- Se indica la necesidad de promover la investigación referente a inundaciones pluviales.
- La mayor parte de los Estados miembros prevén una re-evaluación de la priorización de las medidas.
- Hay consenso del Grupo Europeo a la hora de definir el importante papel que juega el juicio experto en las aproximaciones realizadas para determinar el impacto del cambio climático en las inundaciones. En segundo lugar se encontraría la propia modelización del clima.
- Los cambios detectados en el clima han afectado principalmente a las precipitaciones de los meses de invierno, las tormentas de verano, y la subida del nivel del mar.
- El cambio climático ha conducido principalmente a:
  - La optimización de los embalses para aumentar la retención.
  - El desarrollo de nuevas áreas de retención.
  - La actualización de los niveles de diseño para los sistemas de protección.
- La aplicación de una metodología única para Europa NO es la aproximación más apropiada para determinar los efectos del cambio climático en las zonas inundables y los planes de gestión.

### 3.5.3. Temas importantes para abordar/consensuar durante el segundo ciclo de la Directiva

- Identificar los cambios en los patrones meteorológicos debido al cambio climático para inferir un aumento/descenso del riesgo de inundación.
- Establecer los tipos de inundación que se deben tener en cuenta al evaluar los impactos del cambio climático.

- Decidir los escenarios de emisiones que se deben escoger para desarrollar modelos climáticos.
- Determinar el horizonte temporal que se utilizará para la valoración de la influencia del cambio climático.
- Especificar los modelos climáticos a utilizar y en qué escala de tiempo.
- Establecer el nivel de incertidumbre con respecto al modelo climático, hidrológico, e hidráulico, etc.
- Proporcionar recomendaciones sobre las medidas de adaptación tomadas en consideración para los PGRI.
- Aumentar el esfuerzo para resolver los principales retos clave relacionados con el cambio climático en los distintos niveles (ARPSI, MP y MR y PGRI).

#### 3.5.4. Investigación pendiente de desarrollar

- Estudio de la combinación de los efectos de la subida del nivel del mar y las inundaciones fluviales.
- Regionalización de modelos climáticos globales a regionales y locales, a nivel fluvial, ya que estas condiciones (regionales y locales) deben ser tenidas en cuenta.
- Completar la falta de investigación sobre lluvia extrema y promover proyectos de investigación aplicada para disminuir el nivel de incertidumbre. Por ejemplo, desde los modelos de cambio climático a los modelos hidrológicos e hidráulicos, y Mapas de Peligrosidad y riesgo.
- Análisis de las inundaciones extremas del pasado y su contexto meteorológico y climático. Aplicar la máxima de “si ha ocurrido, puede volver a suceder”.
- Previsión de inundaciones relámpago.
- Estudio de la influencia de otros factores en el aumento del riesgo de inundación. Además del cambio climático, existen otros procesos de cambio ambiental que deben tenerse en cuenta en la revisión de las evaluaciones de riesgos actual y futuro. La planificación del uso del suelo constituye un factor importante en la gestión del riesgo de inundación, por ejemplo, reduciendo la probabilidad de inundación mediante el control del uso del suelo en las zonas susceptibles de inundación. En este sentido, las llanuras de inundación se consideran cada vez más como áreas naturales que favorezcan la retención del agua, o para proporcionar el espacio al río. El compromiso de los organismos de planificación del territorio y demás administraciones competentes resulta necesario para controlar el desarrollo urbano de las zonas inundables y limitar los riesgos asociados.

#### 3.5.5. Cooperación transfronteriza

- Es importante compartir modelos y datos.
- Deben realizarse acuerdos formales (principalmente en estudios fluviales) y revisarlos de acuerdo a los estudios de cambio climático.
- Es fundamental establecer conocimientos comunes de los diferentes efectos del cambio climático.
- Se debe partir de las mismas definiciones y términos, modelos, condiciones de contorno, unidades y escalas, para conseguir unos resultados homogéneos.

#### 3.5.6. Retos del cambio climático para la gestión del riesgo de inundación

- Incorporar el cambio climático en la planificación del uso del suelo, adaptándolo a las condiciones futuras.
- Reducir los efectos negativos del cambio climático, como responsabilidad compartida.

#### 3.5.7. Efectos del cambio climático en los patrones de inundación

- Se han detectado cambios en los patrones de inundación en muchos países (un aumento de la frecuencia de las precipitaciones extremas, una reducción de la nieve).
- Actualmente se está trabajando para actualizar la información disponible y mapas asociados de acuerdo con los escenarios de cambio climático. Hasta el momento no existe mucha información disponible.
- Se necesita mejorar y desarrollar los sistemas de alerta temprana y predicción de avenidas.
- Las medidas contenidas en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación tienen que ser flexibles en su estructura.

## 4

## Primera aproximación metodológica para la consideración del cambio climático en el riesgo de inundación en España, durante el segundo ciclo de la Directiva de Inundaciones

### 4. Primera aproximación metodológica para la consideración del cambio climático en el riesgo de inundación en España, durante el segundo ciclo de la Directiva de Inundaciones

Como primera aproximación para valorar la forma más adecuada de incorporar el cambio climático a los estudios del riesgo de inundación, se ha desarrollado una metodología que reúne las distintas proyecciones climáticas recogidas en los últimos estudios y proyectos europeos, la utilización de un generador meteorológico, un modelo hidrológico para la obtención de hidrogramas de avenida y, finalmente, la simulación hidráulica para la obtención de las zonas inundables asociadas a las distintas hipótesis de clima futuro.

Para valorar la aplicabilidad y validez de esta metodología piloto, se ha aplicado a 5 zonas con riesgo (es decir,

ARPSIs) representativas de la variabilidad presente en el territorio español.

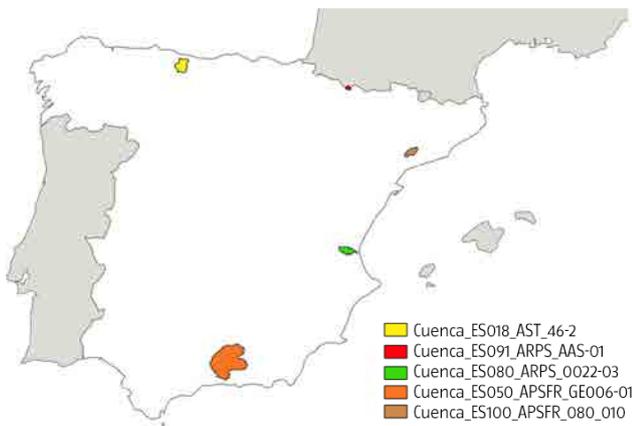
A continuación se procede a recapitular las hipótesis y las consideraciones de partida utilizadas, así como repasar brevemente la metodología general seguida. En base a esto, también se especifican los aspectos que se han visto mejorables o modificables, por si fuera de utilidad en caso de querer aplicar esta metodología en un futuro a otras zonas de riesgo.

Finalmente, también se incluyen los principales resultados de la aplicación de la metodología en las 5 ARPSIs seleccionadas. Es decir, cómo el cambio climático podría afectar a las variables de precipitación y temperatura según las consideraciones de partida seguidas y su traducción en los caudales de avenida y superficies inundables.

Tabla 10.- ARPSIs que han formado parte del estudio piloto

ARPSI	ORGANISMO DE CUENCA	
ES018_AST_46-2	Río Sella en Cangas de Onís	CH Cantábrico
ES050_APSFR_GE006-01	Río Genil en Loja	CH Guadalquivir
ES080_ARPS_0022-03	Rambla de Chiva o de Poyo desde Chiva hasta canal Júcar - Turia	CH Júcar
ES091_ARPS_AAS-01	Río Aragón en Canfranc - Estación	CH Ebro
ES100-APSFR_080_010	Tram alt del Francolí, en Montblanc	Agencia Catalana del Agua

Figura 46.- Ubicación de las ARPSIs del estudio piloto



#### 4.1. Breve descripción de la metodología aplicada

Para evaluar la influencia del cambio climático, la metodología busca realizar una comparativa entre la situación con clima actual y la situación que tendría lugar incorporando ciertas hipótesis de cambio a futuro sobre las variables climáticas de entrada (precipitación y temperatura). Esta comparativa se llevaría a cabo sobre los calados y zonas inundables obtenidos para cada hipótesis.

El esquema general de la metodología seguida es el siguiente:

Figura 47.- Esquema de la metodología seguida

#### MODELO CLIMÁTICO

Valoración de modelos climáticos regionales y elección de proyecciones futuras.  
Obtención de deltas de cambio para cada proyección.

#### MODELO METEOROLÓGICO

Prolongación de las series de Tmax, Tmin y P a 1000 años, para:  
- Clima actual (según los datos de Spain02).  
- Clima futuro (según las proyecciones escogidas).

#### MODELO HIDROLÓGICO

Calibración y validación del modelo.  
Simulación de cada serie de clima (actual y futuro).  
Elaboración de hidrogramas a escala subdiaria a partir de eventos diarios.

#### Datos de partida:

- Análisis de datos de aforos / embalses
- Nieve
- Evapotranspiración
- Edafología
- Geología
- Etc.
- Hidrogeología
- Topografía
- Cobertura vegetal
- Usos del suelo

#### Datos de partida:

- Rugosidades del terreno
- Modelos Digitales del Terreno
- Croquis de obras de fábrica
- Información adicional, etc.

#### MODELO HIDRÁULICO

Eventos de clima actual y aproximaciones futuras  
Análisis de calados y envolventes



De todos los escenarios de distinta probabilidad de ocurrencia considerados por la Directiva de Inundaciones como obligatorios (periodos de retorno 10, 100 y 500 años), se ha seleccionado el periodo de retorno de 100 años como base para realizar la comparativa.

Se trata de una avenida extraordinaria que, por lo general, presenta un elevado impacto en las zonas establecidas como ARPSIs (Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación). Por tanto, se ha desestimado considerar tanto el periodo de retorno inferior (10 años) por los limitados impactos esperables en este extremo de la ley de frecuencias, como el superior (500 años) por el elevado grado de incertidumbre de los valores.

De entre los distintos escenarios de emisión valorados sobre los que basar las proyecciones futuras, se ha decidido no considerar el escenario RCP 4.5 como resultado de la convergencia observada a lo largo del intervalo futuro considerado (2041-2070) entre esta hipótesis y la del RCP 8.5.

Es más adelante en el tiempo cuando ambas hipótesis de emisión divergen significativamente y sí tiene sentido considerar las dos opciones. Por lo tanto, para estos trabajos, se ha optado por únicamente trabajar con el RCP 8.5, al tratarse de ser el peor escenario futuro en cualquier caso.

Del mismo modo, se ha seleccionado el horizonte temporal futuro 2041-2070 por tratarse de un intervalo cuya incertidumbre ha sido considerada como asumible y en el que la influencia del cambio climático puede evidenciarse de forma clara. El intervalo para los datos observados (1971-2010) se seleccionó por la importante cantidad de datos observacionales registrados a través de distintos medios.

#### 4.1.1. Modelo climático

La situación con clima actual se basa en datos observados de precipitación y temperatura, en el intervalo comprendido entre 1971 y 2010, y las hipótesis que considerarán el cambio a futuro se basan en proyecciones climáticas para el intervalo 2041-2070.

Con respecto a estas proyecciones, durante las últimas décadas se han venido realizando periódicamente proyecciones de la tendencia futura del clima utilizando modelos físico-matemáticos de circulación global (GCMs, según sus siglas en inglés). Estos modelos simulan la dinámica del sistema climático bajo distintos escenarios.

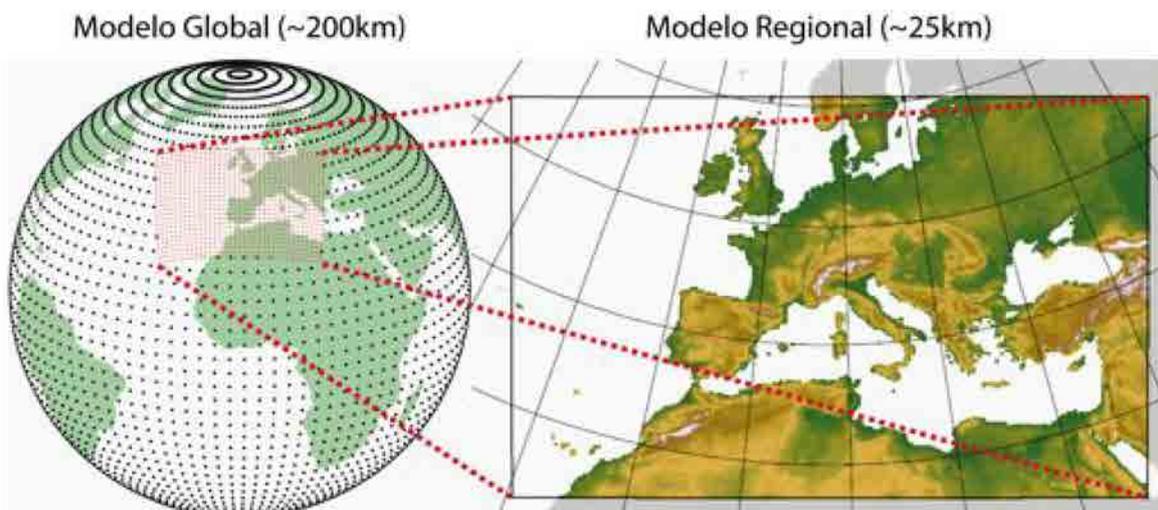
Una de las limitaciones prácticas más importantes de los GCMs es la resolución espacial que utilizan (cientos de kilómetros), que no permite reproducir los procesos climáticos regionales y, por tanto, no permite su uso directo en estudios de impacto.

Para aumentar la resolución, se utilizan “técnicas de regionalización dinámica” (**Figura 48**) que se basan en “anidar” un modelo regional o de área limitada (RCM, del inglés Regional Climate Model) a un GCM particular. Es decir, que el RCM toma como condiciones de contorno los valores del GCM.

Para este estudio, se han utilizado los resultados públicos del proyecto EURO-CORDEX con resolución estándar de 0,11°.

Dado que la variable condicionante del estudio es la precipitación, en primer lugar se realizó un análisis de la capacidad de 12 RCMs para reproducir adecuadamente tanto la media como los extremos de precipitación en España, concluyendo que las distintas combinaciones de GCMs/RCMs producen resultados similares a los observados, aunque tienden a sobreestimar la precipitación media y los extremos debido a los sesgos sistemáticos inherentes a estos modelos.

**Figura 48.-** Regionalización dinámica de un modelo global (200 kilómetros aprox.) mediante el anidamiento de un modelo regional (25 kilómetros aprox.). Fuente: Herrera, 2011.



Dado que las proyecciones regionales realizadas a partir de modelos de circulación global (GCMs, en sus siglas en inglés) presentan sesgos sistemáticos cuando se comparan con observaciones recogidas durante un periodo histórico de referencia (como consecuencia de la orografía o la parametrización de procesos, por ejemplo), ha sido necesario calibrar dichas proyecciones climáticas regionales con datos observacionales representativos de la zona de estudio mediante técnicas de corrección de sesgos.

Estos datos de referencia para la calibración han sido los datos observacionales proporcionados por Spain02v5, en la misma rejilla de  $0.11^\circ$  ( $\sim 11$  km) utilizada por los modelos de EURO-CORDEX (**Figura 49**). Este conjunto de datos proviene de la interpolación de datos de precipitación y temperatura registrados en las estaciones meteorológicas de AEMET entre 1975 y 2015. Este producto ha sido desarrollado por el Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria junto con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Como resultado de la interpolación y partiendo de datos puntuales, se obtienen datos areales. Es decir, datos asimilables para toda la superficie ocupada por cada una de las celdas que componen la malla (también llamadas grids).

Tras la calibración y eliminación de sesgos de los distintos RCMs (12 en total), se han seleccionado única-

mente dos hipótesis de clima futuro para la comparación entre clima actual y clima futuro.

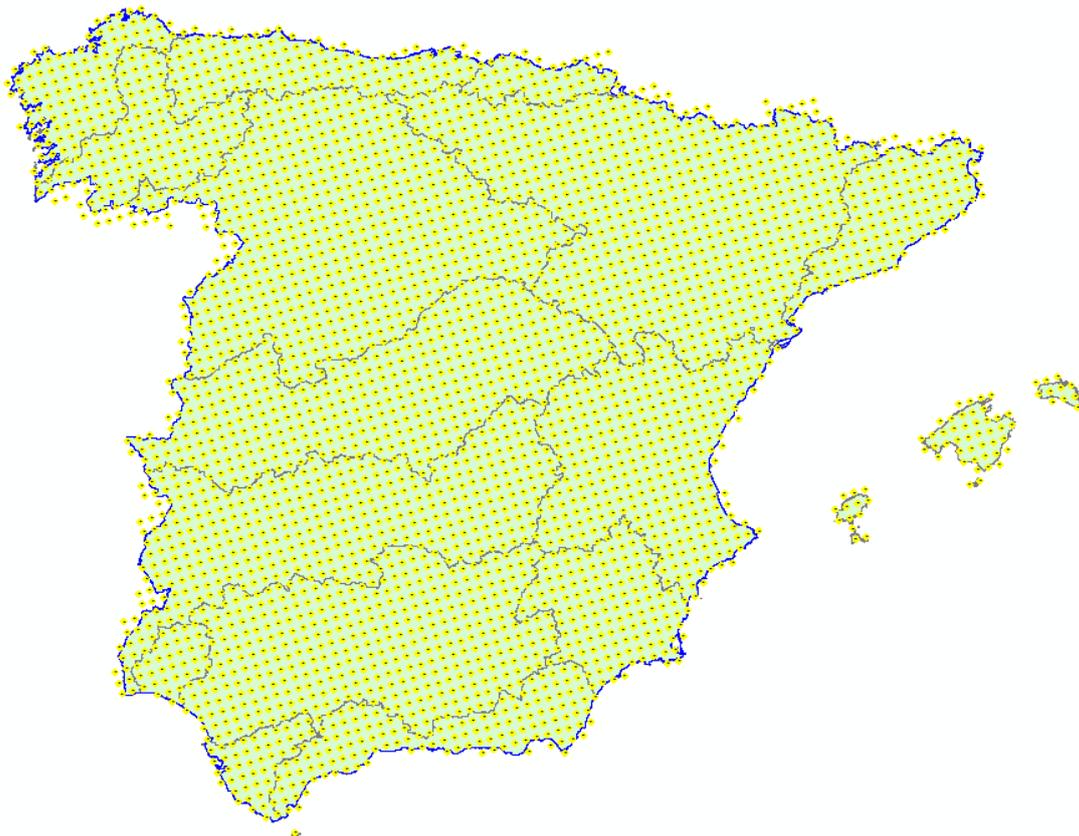
### 4.1.2. Modelo meteorológico

Para calcular el valor del cuantil de 100 años de periodo de retorno, objetivo para la comparación entre clima actual y clima futuro, es necesario tener en cuenta que las series de clima observado o actual son de 40 años y las proyecciones futuras son de 30 años.

Por ello, para asegurar la representatividad de los resultados y un adecuado cálculo del valor de este cuantil, se han prolongado las series de datos (de 30 y 40 años de longitud, según sean de clima actual o proyecciones futuras) a 1000 años utilizando un modelo meteorológico, que mantiene los mismos estadísticos y leyes de frecuencia de partida.

Estos modelos meteorológicos (también denominados generadores meteorológicos) son de tipo estocástico, y generan datos en múltiples sitios de precipitación y temperaturas máxima y mínima diarias. La generación en el espacio es fundamental, debido a la importancia en muchos casos de la variabilidad espacio-temporal de las tormentas extremas. Existen múltiples generadores meteorológicos, pero para este trabajo se ha utilizado el generador meteorológico MULGETS de Chen et al. (2012).

**Figura 49.-** Puntos de la rejilla de EURO-CORDEX (centroide de la celda de la malla) para los que se tienen datos de Spain 02 (España peninsular e islas Baleares)



### 4.1.3. Modelo hidrológico

El modelo hidrológico tiene por objetivo transformar los inputs meteorológicos en los hidrogramas necesarios para la modelación hidráulica. Para poder incorporar adecuadamente la variabilidad espacial del Ciclo Hidrológico es necesario que la modelación hidrológica sea de tipo distribuido, o al menos semidistribuidos con un tamaño máximo de subcuenca claramente inferior al tamaño del mallado de la información meteorológica (que es de 0.11°) y del resto de información espacial utilizada.

En este trabajo se ha utilizado un modelo distribuido de simulación hidrológica escala diaria (TETIS) para calcular los cuantiles de caudales diarios máximos anuales correspondientes al periodo de retorno objetivo. Para la obtención de los hidrogramas, se ha utilizado el mismo modelo pero con paso de tiempo sub-diario. El paso de tiempo sub-diario dependerá del tamaño de la cuenca, variando entre 5 minutos para pequeñas cuencas y una hora para las grandes.

La implementación de un modelo hidrológico distribuido en realidad consiste en primer lugar en la estimación de sus mapas de parámetros a partir de la información espacial existente, y en segundo lugar, en su calibración y validación. Debido al efecto de escala temporal, la calibración del modelo sub-diario será diferente de la del diario.

La conexión entre los modelos hidrológicos diario y sub-diario se realizó a través de la relación o ratio entre los caudales máximos diarios y los correspondientes a la discretización temporal del modelo sub-diario, en unos casos en la estación de aforos y en otros a partir de la simulación de eventos históricos con ambos modelos.

Finalmente, se ha procedido a realizar las distintas simulaciones, obteniendo 3 series de caudales diarios de 1000 años: una serie de caudales en clima actual y dos series que recogerían la influencia del cambio climático. A partir de ellas, se ha calculado el cuantil de caudal diario máximo anual de 100 años de periodo de retorno para cada hipótesis.

Para los hidrogramas necesarios en la modelación hidráulica, en unos casos se re-escalaron eventos de tormentas históricas, de tal forma que el caudal pico obtenido fuese el del cuantil diario convertido en sub-diario. En otros casos, se utilizó un caudal constante correspondiente al caudal pico sub-diario.

### 4.1.4. Modelo hidráulico

Para obtener las zonas inundables y los calados asociados a cada hipótesis de clima, sobre los que se realizará la comparación final, se ha elaborado un modelo hidráulico bidimensional en el programa IBER utilizando los datos de partida incorporados durante la aplicación del primer ciclo de la Directiva de

Inundaciones, siempre que ha sido posible, gracias a las Demarcaciones Hidrográficas u Organismos de Cuenca implicados.

Esta información de partida comprende desde datos físicos (Modelos Digitales del Terreno o datos de rugosidad en función de los usos del suelo) a obras de fábrica (croquis de obras transversales de distinta entidad) pasando por las propias memorias elaboradas según los trabajos realizados.

Para finalizar, se han simulado hidráulicamente los cuantiles de T100 de las series de caudales obtenidas en el modelo hidrológico y se han comparado los distintos resultados.

## 4.2. Conclusiones obtenidas tras la aplicación de la metodología piloto en España

En definitiva, para la valoración del cambio climático y teniendo en cuenta toda la casuística presente, las consideraciones de partida en esta metodología piloto han sido las siguientes:

Tabla 11.- Consideraciones metodológicas de partida

Periodo de retorno	100 años
Escenario de emisión de gases de efecto invernadero	RCP 8.5
Intervalo temporal de clima actual	1971-2010
Intervalo temporal de clima futuro	2041-2070
Nº de RCMs seleccionados	2
Fuente de los datos observados de referencia	Spain02
Modelo de simulación hidrológica	TETIS
Modelo de simulación hidráulica	IBER

A continuación se incluyen las conclusiones obtenidas tras la aplicación de esta metodología.

### 4.2.1. Conclusiones sobre la metodología aplicada

#### ◆ Proyecciones climáticas

Para comparar los resultados entre clima actual y sus proyecciones futuras seleccionadas se ha optado únicamente por la selección de dos proyecciones o RCMs.

Sin embargo, podría ser conveniente incorporar los datos de los 12 RCMs que forman parte del propio proyecto EURO-CORDEX utilizado como fuente de información, el máximo posible, al entender que cada uno de ellos supone una proyección distinta de la evolución del clima pero igualmente válida, es decir, que son equiprobables.

Al considerar todos ellos, se reuniría toda la variabilidad natural presente en el clima y, además, la probabilidad de cambio estaría afianzada por un mayor número de modelos.

Esta probabilidad de cambio, en cualquier caso, podría analizarse como la mediana de los resultados de todos estos RCMs, no solamente la horquilla definida por “el mejor y peor” resultado posible, ya que de esta forma se asimilaría el comportamiento aleatorio del clima.

### ◆ Datos observacionales de partida (Spain02 y Anuario de Aforos)

Para calibrar los datos de las proyecciones climáticas seleccionadas, se han tomado como referencia los datos observacionales proporcionados por el proyecto Spain02v5, que facilita datos en la misma rejilla de 11 km utilizada por los modelos de EURO-CORDEX.

Siguiendo la metodología, se han considerado los datos de todos los grids o celdas de Spain02 cuyo centroide se encontrase ubicado en el interior de la cuenca de estudio, desestimando los grids con escasa representación en la superficie a estudiar.

Sin embargo, esto ha podido ocasionar la falta de información representativa en zonas próximas a los límites de la cuenca, condicionando los resultados.

No debería pensarse que al encontrarse fuera de la cuenca los datos de estos grids no son extrapolables al interior, como consecuencia de que el centroide se encuentre en otra vertiente u orientación.

Tal y como se explica en la metodología de desarrollo de Spain02, los propios datos ya incorporan la propia “realidad” de su ubicación, por lo que no sería necesario considerar adicionalmente otros aspectos como la orografía. Según su metodología, los datos son extrapolables a una celda de 11x11, independientemente de divisiones Hidrográficas u orientaciones.

Como consecuencia de no considerar la información de todos los grids con representación en las cuencas de estudio, todas ellas han incorporado menor información de precipitación y temperatura.

Esto ha sido más relevante en el caso de las cuencas de menor tamaño. Por ejemplo, en el caso de la cuenca del ARPSI del río Aragón en Canfranc - Estación, se han incorporado los datos de un solo grid en vez de los cuatro con representación o en el ARPSI del río Francolí en Montblanc, donde solo se han considerado los datos de tres en vez de los siete presentes.

Por otro lado, según se ha recogido en el documento de “Metodología general”, una de las principales limitaciones de este tipo de bases de datos es que los eventos extremos podrían verse suavizados tras el proceso de interpolación (sobre todo en el caso de la precipitación) (Fernández y Sáenz, 2003), aunque según se menciona en Herrera (2011), algunos estudios recientes con-

sideran que la interpolación en estas rejillas sí podría reproducir correctamente la intensidad y distribución espacial de los eventos extremos.

Sin embargo, existe una falta de correspondencia entre algunos eventos de precipitación de Spain02 y los caudales registrados por ciertas estaciones de aforos, lo que puede haber provocado la obtención de datos de caudales no representativos de las cuencas de estudio al no facilitar una correcta calibración/validación del modelo hidrológico.

Sin embargo, no es posible saber cuál es el dato discordante. No se ha podido comprobar el origen de los datos del Anuario de Aforos, pero sí se ha verificado la existencia y ubicación de las estaciones de AEMET de las cuencas de estudio, de las cuales procede la interpolación de los datos de los grids de Spain02. Se desconoce cuáles de ellas han podido utilizarse en dicha interpolación y cuáles no, ni la longitud de sus datos, etc.

Sí se observa que hay zonas con adecuada representación de datos de AEMET, en contraposición a otras, donde apenas hay estaciones meteorológicas. Este hecho, unido al hecho de que no se hayan considerado grids de Spain02 con superficie en la cuenca de estudio, puede haber favorecido discrepancias en la información a calibrar.

### ◆ Utilización del modelo meteorológico (MULGETS)

Este programa no es complejo de usar, pero se ha observado que este generador no es capaz de reproducir adecuadamente fenómenos convectivos. Por tanto, como recomendación general se puede decir que los generadores son una solución para ampliar la longitud de la serie de datos, son sencillos de implementar y respecto de cuál se debe utilizar se concluye que para cada caso de estudio se deberá utilizar aquel que produzca mejor los estadísticos de la precipitación diaria.

### ◆ Utilización del modelo hidrológico (TETIS)

Por una parte, la utilización del modelo TETIS ha supuesto la necesidad de recabar numerosa información relativa a las características físicas de la cuenca así como su tratamiento para la incorporación en el modelo, aparte de las series de caudales, precipitación y temperaturas, entre otros. Sin embargo, este esfuerzo es necesario si se quiere tener resultados de la máxima confiabilidad.

Por otra parte, un inconveniente potencial de los modelos distribuidos es la calibración de sus parámetros efectivos en todas las celdas. Este problema puede ser resuelto mediante estrategias de regularización de los mapas de parámetros estimados inicialmente a partir de la información ambiental disponible, de tal forma que pasa a ser factible la calibración, incluso automática, del modelo distribuido. Un caso particular de esta regularización es el empleo de factores correctores de los mapas de parámetros iniciales, como se realiza en TETIS, lo cual lo hace extraordinariamente potente en este aspecto.

#### Utilización del modelo hidráulico (IBER)

Con respecto al modelo de simulación hidráulica bidimensional IBER, se considera que los resultados obtenidos son acordes a lo esperado. Se trata de un programa en el que la incorporación de los datos de entrada es rápida y los tiempos de simulación han sido asumibles, al menos en los casos estudiados (depende de la resolución del Modelo Digital del Terreno, la longitud de la simulación, etc.).

En conclusión, para el desarrollo de una metodología de estas características se recomendaría continuar utilizando modelos bidimensionales, puesto que no se ha observado ningún inconveniente derivado de su uso durante la aplicación de esta metodología.

#### 4.2.2. Conclusiones sobre los resultados obtenidos

Los análisis realizados para comprobar la influencia del cambio climático han recaído principalmente sobre la componente meteorológica (temperaturas y precipitación), a falta de caudales concluyentes.

El procedimiento ha sido el siguiente. Primero se han calculado los valores medios de estos parámetros para cada grid considerado, y para cada serie (clima actual y a futuro). Es decir, se han obtenido valores medios de temperatura máxima, mínima y precipitación diaria para cada grid. En caso de tener cinco grids en la cuen-

ca, se han obtenido 3 valores medios por cada uno de cinco grids, de acuerdo a cada variable.

Posteriormente, y para obtener un valor medio asimilable a la cuenca, se ha calculado el promedio de los valores para cada grid. Es decir, siguiendo el ejemplo anterior, en caso de tener cinco grids, se habrían calculado cinco valores medios de precipitación. El valor medio asimilable para la cuenca sería el promedio de esos valores medios.

A continuación se procede a valorar el análisis realizado de las series de temperaturas y de precipitación.

#### Influencia del cambio climático en las temperaturas máximas y mínimas

Los resultados obtenidos en cuanto a la posible influencia en las temperaturas, indican que tanto las temperaturas máximas como mínimas aumentan su media en todas las cuencas de estudio, encontrándose mayor aumento en uno de los RCMs invariablemente (RCA4\_v1).

En las tablas a continuación se incluye la valoración cualitativa de este cambio, tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas, así como una aproximación del grado de variación. Es importante hacer notar la incertidumbre asociada a todos estos procedimientos, por lo que el dato sobre la media de variación sólo debería ser tomado como indicativo de la magnitud del cambio, no como un dato exacto.

Tabla 12.- Variación media de la temperatura máxima en cada ARPSI de estudio, por cada RCM

		VARIACIÓN MEDIA DE LA TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	
		INFLUENCIA DEL CC RCM CCLM4-8-17_v1	INFLUENCIA DEL CC RCM RCA4_v1
CH EBRO	Río Aragón en Canfranc – Estación	Aumenta (1.92°)	Aumenta (3.79°)
AGENCIA CATALANA DEL AGUA	Tram alt del Francolí, en Montblanc	Aumenta (1.21°)	Aumenta (1.76°)
CH GUADALQUIVIR	Río Genil en Loja	Aumenta (1.73°)	Aumenta (2.90°)
CH CANTÁBRICO OCCIDENTAL	Río Sella en Cangas de Onís	Aumenta (0.90°)	Aumenta (1.60°)
CH JÚCAR	Rambla del Poyo	Aumenta (0.96°)	Aumenta (1.38°)

Tabla 13.- Variación media de la temperatura mínima en cada ARPSI de estudio, por cada RCM

		VARIACIÓN MEDIA DE LA TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	
		INFLUENCIA DEL CC RCM CCLM4-8-17_v1	INFLUENCIA DEL CC RCM RCA4_v1
CH EBRO	Río Aragón en Canfranc – Estación	Aumenta (1.23°)	Aumenta (2.23°)
AGENCIA CATALANA DEL AGUA	Tram alt del Francolí, en Montblanc	Aumenta (1.23°)	Aumenta (2.10°)
CH GUADALQUIVIR	Río Genil en Loja	Aumenta (1.37°)	Aumenta (1.95°)
CH CANTÁBRICO OCCIDENTAL	Río Sella en Cangas de Onís	Aumenta (1.15°)	Aumenta (1.64°)
CH JÚCAR	Rambla del Poyo	Aumenta (1.02°)	Aumenta (1.47°)

### 💧 Precipitaciones

En relación con la variación de los valores de precipitación según cada hipótesis de cambio climático (o RCM), se han analizado los cambios en la precipitación diaria y en el porcentaje de días con lluvia (lluvia a partir de 0.1 mm).

Al contrario de lo que ocurre con las temperaturas máximas y mínimas, donde el cambio simulado sigue la misma tendencia, en las precipitaciones se observa mayor variabilidad. Se ha optado por no incluir ningún dato exacto dado la particular incertidumbre asociada a esta variable.

Vistos los resultados, no es posible ofrecer ninguna previsión del cambio en el régimen de precipitaciones como consecuencia del cambio climático, ya que es resultado de múltiples factores. En cualquier caso, el resultado de cada cuenca de estudio no sería extrapolable al conjunto de la Demarcación ya que las

condiciones varían incluso entre zonas próximas, sino que sería necesario analizar cada cuenca en concreto con sus condiciones y condicionantes particulares.

En relación con la variación del porcentaje de días con lluvia, se observa una disminución para los dos RCMs del análisis y en todas las cuencas de estudio.

Este porcentaje se ha calculado comprobando el número de días con precipitación (la lluvia superior a 0.1 mm) en relación con el total de los datos. Esto se ha llevado a cabo en las series de 1000 años de datos (es decir, tanto en la prolongación de la serie en clima actual como en las de las dos hipótesis de cambio climático).

Es decir, aunque no sea posible aproximar el cambio en la precipitación diaria sí parece observarse una tendencia a la reducción de los días con lluvia, es decir, a llover menos.

Tabla 14.- Variación media de la precipitación en cada ARPSI de estudio, por cada RCM

		VARIACIÓN MEDIA DE LA PRECIPITACIÓN	
		INFLUENCIA DEL CC RCM CCLM4-8-17_v1	INFLUENCIA DEL CC RCM RCA4_v1
CH EBRO	Río Aragón en Canfranc - Estación	Sin cambio	Sin cambio
AGENCIA CATALANA DEL AGUA	Tram alt del Francolí, en Montblanc	Aumenta	Aumenta
CH GUADALQUIVIR	Río Genil en Loja	Variable	Reducción
CH CANTÁBRICO OCCIDENTAL	Río Sella en Cangas de Onís	Aumenta	Variable
CH JÚCAR	Rambla del Poyo	Aumenta	Aumenta

Tabla 15.- Variación del porcentaje de días con lluvia por cada ARPSI de estudio y cada RCM

		% DE DÍAS CON LLUVIA EN LA CUENCA		
		CLIMA ACTUAL	RCM CCLM4-8-17_v1	RCM RCA4_v1
CH EBRO	Río Aragón en Canfranc - Estación	54% de días con lluvia	Reducción (50% de días con lluvia)	Reducción (52% de días con lluvia)
AGENCIA CATALANA DEL AGUA	Tram alt del Francolí, en Montblanc	31 % de días con lluvia	Reducción (27% de días con lluvia)	Reducción (28% de días con lluvia)
CH GUADALQUIVIR	Río Genil en Loja	32% de días con lluvia	Reducción (25% de días con lluvia)	Reducción (26% de días con lluvia)
CH CANTÁBRICO OCCIDENTAL	Río Sella en Cangas de Onís	55 % de días con lluvia	Reducción (49% de días con lluvia)	Reducción (51% de días con lluvia)
CH JÚCAR	Rambla del Poyo	16% de días con lluvia	Reducción (13% de días con lluvia)	Reducción (13% de días con lluvia)

### 4.2.3. Caudales y zonas inundables

Como consecuencia de los problemas a la hora de calibrar y validar los modelos hidrológicos y de las discrepancias observadas en algunos datos de partida (no correspondencia entre algunos datos de precipitación y caudales para el mismo instante temporal), no se podrían considerar los valores de caudal obtenidos, los del cuantil de 100 años, como representativos de cada cuenca de estudio, sino únicamente como indicación cualitativa de la señal del cambio.

En cualquier caso, sería necesario obtener unos datos representativos de caudales para poder afirmar esta posible tendencia del cambio, ya que los resultados podrían variar.

Teniendo esto presente, se puede concluir que las zonas inundables obtenidas tras las simulaciones hidráulicas se encuentran en consonancia con los caudales de partida.

A continuación se incluye una tabla resumen que recoge una valoración cualitativa de estos caudales obtenidos para cada ARPSI de estudio. En caso de que el ARPSI se encuentre ubicada en dos cauces, como en el caso del ARPSI de la CH Guadalquivir, la valoración se refiere al cauce del río principal. En caso de que la simulación haya considerado varias inserciones de caudal, la valoración describe los resultados del ARPSI.

**Tabla 16.- Variación cualitativa del cambio en el valor del caudal de 100 años de periodo de retorno en cada ARPSI de estudio, por cada RCM, según la metodología aplicada**

		VARIACIÓN EN EL CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS	
		INFLUENCIA DEL CC RCM CCLM4-8-17_v1	INFLUENCIA DEL CC RCM RCA4_v1
CH EBRO	Río Aragón en Canfranc - Estación	Aumento	Sin cambios
AGENCIA CATALANA DEL AGUA	Tram alt del Francolí, en Montblanc	Aumento	Aumento
CH GUADALQUIVIR	Río Genil en Loja	Aumento	Reducción
CH CANTÁBRICO OCCIDENTAL	Río Sella en Cangas de Onís	Aumento	Aumento
CH JÚCAR	Rambla del Poyo	Reducción	Aumento



## 5

## Recomendaciones para la incorporación de la influencia del cambio climático en la EPRI

### 5. Recomendaciones para la incorporación de la influencia del cambio climático en la EPRI

Como se ha visto, la señal del cambio obtenida para la variable precipitación no es común entre las distintas ARPSIs que han conformado el estudio piloto, como resultado de la propia variabilidad natural de los distintos RCMs.

Al contrario que con la variable precipitación, sí se observa una tendencia similar en las temperaturas máximas y mínimas, viéndose aumentadas en ambos escenarios.

De cara a la revisión de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, la valoración de la influencia del cambio climático debería seguir las siguientes recomendaciones:

- El análisis de la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación debería acometerse a nivel de Demarcación Hidrográfica u Organismo de Cuenca, determinando las zonas donde se prevean cambios en la precipitación.
- Deberían utilizarse los datos de todos los RCMs que conforman el proyecto europeo de CORDEX, al entender que todos ellos suponen alternativas equiprobables y es necesario incorporarlos para considerar la variabilidad natural inherente al clima.
- Es necesario analizar la fiabilidad y coherencia de la información de partida siempre que sea posible, tanto a nivel climático como físico. Y, en cualquier caso, utilizar toda la que se encuentre disponible para la zona de estudio.
- Dado que el objetivo es ofrecer a las Demarcaciones Hidrográficas una valoración cualitativa del cambio en el régimen de caudales a nivel de cuenca (por su relación directa con el riesgo de inundación) de cara a que estos organismos consideren la posibilidad de incorporar nuevas zonas de riesgo en la EPRI para su estudio en las siguientes fases (no un cálculo exacto de su valor) se recomienda un análisis general de dicho cambio. Es decir, no es necesario afrontar simulaciones hidrológicas ni hidráulicas para la consideración del cambio climático en la EPRI, sino solo facilitar un dato cualitativo basado en un cálculo sencillo de dicha variación.
- En cualquier caso, si finalmente se opta por utilizar modelos de simulación, éstos deben ser de fácil manejo y deben incorporar el menor número de datos de entrada posible, ya que reducen el tiempo de preparación de la información y la incertidumbre asociada a los propios datos.



# Índice de Tablas y Figuras

## Índice de Tablas y Figuras

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.-</b> Las cuatro familias de escenarios de emisiones del cuarto informe del IPCC en relación al calentamiento global proyectado para el 2100 (Fuente IPCC, 2007).....	<b>8</b>
<b>Tabla 2.-</b> Número de estaciones con puntos de ruptura en la media y en la varianza, y signo de la tendencia posterior al punto de ruptura.....	<b>22</b>
<b>Tabla 3.-</b> Resumen de los cambios más significativos y robustos sobre las tendencias de caudales Q100 en Europa (Alfieri et al., 2015a; EEA, 2017).....	<b>27</b>
<b>Tabla 4.-</b> Principales resultados obtenidos para las Demarcaciones Hidrográficas en relación al estudio del CEDEX (2010). PMX: Precipitación Máxima diaria anual.....	<b>31</b>
<b>Tabla 5.-</b> Cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.....	<b>34</b>
<b>Tabla 6.-</b> Porcentaje del cambio proyectado en el nivel de caudal diario máximo de 100 años (Q100) en distintas Demarcaciones Hidrográficas. Extraídos de Alfieri et al. (2015a).....	<b>36</b>
<b>Tabla 7.-</b> Análisis cualitativo de la respuesta de diferentes cuencas españolas a posibles impactos del cambio climático (Benito et al., 2005a).....	<b>37</b>
<b>Tabla 8.-</b> Consideración del cambio climático y de tendencias a largo plazo de indicadores de cambio ambiental, por parte de países miembros de la UE dentro de la Directiva de Inundaciones (en la fase de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI). Los países están listados según la abreviatura oficial de la UE. Fuente: European Commission, 2015.....	<b>53</b>
<b>Tabla 9.-</b> Consideración de diferentes métodos, modelos y escenarios por parte de los Estados Miembros de la UE para la generación de mapas de inundación durante el primer ciclo de implementación de la Directiva de Inundaciones. S: Método o modelo considerado. N: Método o modelo no considerado. Los países están listados según la abreviatura oficial de la UE. Fuente: European Commission, 2015.....	<b>54</b>

<b>Tabla 10.-</b> ARPSIs que han formado parte del estudio piloto.....	<b>68</b>
<b>Tabla 11.-</b> Consideraciones metodológicas de partida.....	<b>71</b>
<b>Tabla 12.-</b> Variación media de la temperatura máxima en cada ARPSI de estudio, por cada RCM.....	<b>73</b>
<b>Tabla 13.-</b> Variación media de la temperatura mínima en cada ARPSI de estudio, por cada RCM.....	<b>73</b>
<b>Tabla 14.-</b> Variación media de la precipitación en cada ARPSI de estudio, por cada RCM.....	<b>74</b>
<b>Tabla 15.-</b> Variación del porcentaje de días con lluvia por cada ARPSI de estudio y cada RCM.....	<b>74</b>
<b>Tabla 16.-</b> Variación cualitativa del cambio en el valor del caudal de 100 años de periodo de retorno en cada ARPSI de estudio, por cada RCM, según la metodología aplicada.....	<b>75</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1 -</b> Escenarios de emisión mínimo (RCP 2.6) y máximo (RCP 8.5) y su equivalente en subida de temperatura media hasta 2100 (Fuente IPCC, 2014).....	<b>9</b>
<b>Figura 2.-</b> Escenarios de emisión mínimo (RCP 2.6) y máximo (RCP 8.5) y su equivalente en subida de temperatura media hasta 2100 (Fuente IPCC, 2014).....	<b>10</b>
<b>Figura 3.-</b> Tendencias de los eventos de inundación en diferentes países europeos para los meses de invierno y primavera (a) y verano y otoño (b), basados en análisis estadísticos de las series de caudal además de descripciones cualitativas de registros históricos y de paleocrecidas.....	<b>14</b>
<b>Figura 4 -</b> A.- Distribución de la precipitación máxima diaria para un período de retorno de 100 años (MIMAM, 2000 y Brandão et al., 2001). B, C, D: Distribución espacial de las tendencias (+: positiva; -: negativa; = falta de tendencia) en el período de retorno de 20 años de precipitación máxima estacional (mm década <sup>-1</sup> ) durante el período de 1958 a 2004. Los triángulos ascendentes y descendentes indican tendencias positivas y negativas respectivamente (según Acero et al., 2011). Modificada de Benito y Machado (2012).....	<b>17</b>
<b>Figura 5. -</b> Precipitaciones anuales en la zona ERHIN del Pirineo para el periodo hidrológico 1950/51-2005/06. Temperaturas medias anuales en la zona ERHIN del Pirineo para el periodo hidrológico 1950/51-2005/06. Según ERHIN, 2008.....	<b>18</b>
<b>Figura 6. -</b> Evolución del volumen de agua acumulado en forma de nieve (VAFN) en la cuenca del Ebro para las cuencas del Pirineo modelizadas por ERHIN para el periodo hidrológico 2002/03-2006/07. ERHIN, 2008.....	<b>19</b>
<b>Figura 7. -</b> Hidrograma de avenida de las inundaciones del Ebro en febrero de 2003. Caudales quinceminutales registrados por el Servicio Automático de Información Hidrológica (SAIH). Según Galván et al., 2004.....	<b>19</b>
<b>Figura 8. -</b> Caudales máximos anuales registrados en los ríos Duero (arriba) y Guadalquivir (abajo). En la figura inferior se muestra la relación entre los mayores caudales pico y valores negativos del índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO) registrado durante los meses de invierno (Diciembre-Enero-Febrero (DJF)). Figura modificada de Benito y Machado (2012).....	<b>21</b>
<b>Figura 9. -</b> Mapas con la distribución espacial de las series de caudales máximos con puntos de ruptura en la media (derecha) y varianza (izquierda). Los triángulos indican decremento en la media o varianza después del punto de ruptura, mientras los círculos indican incremento (López de la Cruz, 2013).....	<b>21</b>
<b>Figura 10. -</b> Distribución espacial de las series de caudales máximos estacionales con tendencias temporales en la media (panel superior) y varianza (panel inferior) detectados con el test de Mann-Kendall. Los triángulos rojos indican tendencia negativa, mientras que los círculos azules tendencia positiva (López de la Cruz, 2013).....	<b>23</b>
<b>Figura 11. -</b> Los cambios estacionales (en %) previstos en la precipitación extrema se definen como el percentil 95 de la precipitación diaria (sólo se consideran días con precipitación > 1 mm/día) para el período 2071-2100 en comparación con 1971-2000. En los meses de diciembre-enero-febrero (DJF; Fig 9.a) y de junio-julio- agosto (JJA; Fig 9.b). Las áreas sombreadas indican que las regiones con un nivel de confianza (al menos el 66% de los modelos coinciden en el signo de cambio) y / o un cambio estadísticamente significativo (significativo a un nivel de confianza del 95% utilizando el test U de Mann-Whitney). Adaptado de Jacob et al. (2014).....	<b>24</b>
<b>Figura 12. -</b> Cambio relativo del caudal de T100 años entre el escenario (2071-2100) y el periodo de control (1961-1990). Según Dankers y Feyen (2009).....	<b>26</b>
<b>Figura 13. -</b> Cambio proyectado en el caudal máximo diario para un periodo de retorno de 100 años (Q100). Cambio relativo para los periodos 2006-2035 (2020), 2036-2065 (2050) y 2066-2095 (2080) en comparación con la media de conjunto de la línea de base (1976-2005). (Alfieri et al., 2015a). Fuente: Projected change in river floods with a return period of 100 years, Joint Research Centre (JRC). Disponible en la web de la European Environmental Agency.....	<b>28</b>
<b>Figura 14. -</b> Cambios del valor medio anual de los índices extremos de días consecutivos con lluvia (a)-(b), y precipitaciones intensas (c)-(d) en la España peninsular para el siglo XXI obtenidos mediante técnicas de regionalización dinámica (izquierda)	



y estadística (derecha). Entre paréntesis se recoge el número de proyecciones realizadas para cada escenario. En línea continua (sombreada) se representa el valor promedio (incertidumbre). En (b) las franjas verticales sombreadas indican las ventanas temporales en las que el número de regionalizaciones es máximo. Según Morata (2014). ..... 29

- Figura 15** . - Cambios en precipitación máxima diaria (PMX) respecto al periodo de control (1961-1990). (CEDEX, 2010)..... 30
- Figura 16** . - Fracción de la precipitación diaria percentil >95% respecto a la precipitación total anual (CEDEX, 2010)..... 30
- Figura 17** . - Cambio de la precipitación extrema asociada a un período de retorno de 100 años, y significancia estadística (p-valores) del cambio esperado, de acuerdo con el escenario RCP 4.5 / RCP 8.5 . La comparación se realiza entre el período 2051-2100 y 1951-2000. En la figura de la derecha, detalle de la zona más densa (Valencia). Según Monjo et al. (2016) 32
- Figura 18** . - Cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX..... 33
- Figura 19** . - Distribución geográfica del cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Izquierda: Cambio máximo de la media anual en R95T. Derecha : Moda del valor de cambio en R95T. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX..... 34
- Figura 20** . - Detalle sobre cambio proyectado en el nivel de caudal diario máximo de 100 años (Q100) para la Península Ibérica (Alfieri et al., 2015a). El cambio relativo para los periodos 2006-2035 (2020), 2036-2065 (2050) y 2066-2095 (2080) se muestra en comparación con la media de conjunto de la línea de base (1976-2005)..... 36
- Figura 21** . - A: Costes anuales por inundaciones en España pagados por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS, 2010), en millones de euros actualizados al 31/12/2009. B: Pérdidas anuales debidas a inundaciones en España normalizadas considerando los efectos de los cambios en la población, la riqueza y la inflación (según Benito y Machado, 2012)... 39
- Figura 22** . - Mapa de daño potencial por inundaciones en Europa (Barredo et al., 2008). ..... 40
- Figura 23**.- Países que han analizado la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación. Fuente: Radulescu, 2017... 47
- Figura 24**.- Fases de la Directiva de Inundaciones en las que se analizó la influencia del cambio climático según la información facilitada por los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017..... 47
- Figura 25**.- Tipos de inundación considerados por los Estados miembros al evaluar el impacto del cambio climático. Fuente: EWGF, 2017..... 48
- Figura 26**.- Tipos de modelos climáticos considerados por los Estados miembros al evaluar el impacto del cambio climático. Fuente: EWGF, 2017..... 48
- Figura 27**.- Intervalos temporales considerados por los Estados miembros al evaluar el impacto del cambio climático, según las respuestas de los Estados Miembros. Fuente: EWGF, 2017..... 49
- Figura 28**.- Incorporación de la información relativa a cambio climático en los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación, según las respuestas de los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017..... 49
- Figura 29**.- Forma de valoración de la incertidumbre considerada por los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017..... 49
- Figura 30**.- Ejemplo de mapa de peligrosidad con cambio climático correspondiente a un periodo de retorno de 100 años en Edsbyn, Suecia. Fuente: <https://www.msb.se>..... 55
- Figura 31**.- Ejemplo de mapa de zonas inundables con cambio climático para distintos periodos de retorno en Edsbyn, Suecia. Fuente: <https://www.msb.se> ..... 56
- Figura 32**.- Ejemplo de mapa de riesgo de inundación de Edsbyn, Suecia. Fuente: <http://www.lansstyrelsen.se/vasternorrland/Sv/Pages/default.aspx>..... 57
- Figura 33**.- Ejemplo de mapa de peligrosidad de Belfast (Irlanda del Norte, Reino Unido). Fuente: Rivers Agency..... 58
- Figura 34**.- Ejemplo de distintos escenarios de peligrosidad (con cambio climático y sin cambio climático) para la ciudad de Belfast (Irlanda del Norte, Reino Unido). Fuente: Visor web de zonas inundables de Irlanda del Norte, Reino Unido... 58
- Figura 35**.- Patrones meteorológicos que parecen encontrarse influenciados por el cambio climático, según las respuestas de los Estados miembros. Fuente: Radulescu, 2017. .... 59
- Figura 36**.- Tipos de inundación que se van tener en cuenta al evaluar los impactos de cambio climático. Fuente: EWGF, 2017. 59
- Figura 37**.- Escenarios de emisión que los Estados miembros consideran que deben incorporarse para valorar la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación. Fuente: EWGF, 2017..... 60
- Figura 38**.- Modelos climáticos que los Estados miembros pretenden implementar en el segundo ciclo de implantación de la Directiva de Inundaciones y su escala temporal. Fuente: EWGF, 2017..... 60
- Figura 39**.- Estudios o enfoques complementarios y/o alternativos para reducir la incertidumbre asociada a los modelos climáticos, según las respuestas aportadas por los Estados miembros. Fuente: EWGF, 2017..... 61

<b>Figura 40.-</b> Campos en los que los Estados miembros consideran que es necesario aumentar la investigación. Fuente: EWGF, 2017.....	<b>61</b>
<b>Figura 41.-</b> Estados miembros que se plantean una evaluación de la priorización de las medidas de los PGRI, según sus respuestas. Fuente: EWGF, 2017.....	<b>62</b>
<b>Figura 42.-</b> Afecciones que los Estados miembros consideran que pueden ocurrir en las ARPSIs fluviales como consecuencia de la influencia del cambio climático. EWGF, 2017.....	<b>62</b>
<b>Figura 43.-</b> Medidas de adaptación que deberían incluirse en los PGRI por los Estados miembros, según sus respuestas. EWGF, 2017.....	<b>63</b>
<b>Figura 44.-</b> Posibles medidas de adaptación de las infraestructuras y edificios según las respuestas de los Estados miembros de acuerdo a sus PGRI. EWGF, 2017.....	<b>64</b>
<b>Figura 45.-</b> Medidas de adaptación a implementar por los Estados miembros para evitar los impactos de cambio climático. EWGF, 2017.....	<b>64</b>
<b>Figura 46.-</b> Ubicación de las ARPSIs del estudio piloto .....	<b>68</b>
<b>Figura 47.-</b> Esquema de la metodología seguida .....	<b>68</b>
<b>Figura 48.-</b> Regionalización dinámica de un modelo global (200 kilómetros aprox.) mediante el anidamiento de un modelo regional (25 kilómetros aprox.). Fuente: Herrera, 2011.....	<b>69</b>
<b>Figura 49.-</b> Puntos de la rejilla de EURO-CORDEX (centroide de la celda de la malla) para los que se tienen datos de Spain 02 (España peninsular e islas Baleares).....	<b>70</b>
Moda del valor de cambio de la matriz de valores anuales de % de cambio de la lluvia extrema escenario de emisiones RCP 4.5 / RCP 8.5 en la matriz de datos de 30 años (ventana temporal) generados con 10 modelos de clima regional. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.....	<b>94</b>
Distribución espacial de los cambios por Demarcaciones Hidrográficas, para los tres horizontes temporales. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.....	<b>95</b>
Mediana del valor de cambio de la matriz de valores anuales de % de cambio de la lluvia extrema escenario de emisiones RCP 4.5 / RCP 8.5 en la matriz de datos de 30 años (ventana temporal) generados con 10 modelos de clima regional. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.....	<b>96</b>
Distribución espacial de los cambios por Demarcaciones Hidrográficas, para los tres horizontes temporales. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.....	<b>96</b>

# Anejo 1

## Referencias bibliográficas

### Referencias bibliográficas

#### Referencias bibliográficas referentes a la revisión técnica sobre cambio climático

ABI, 2005. Financial risks of climate change. Association of British Insurers, London, UK., 39pp <http://www.abi.org.uk/climatechange>.

Acero, F.J., García, J.A., Gallego, M.C., 2011. Peaks-over-Threshold Study of Trends in Extreme Rainfall over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*, 24:1089–1105.

Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G., 2015a. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrological Earth System Science*, 19:2247–2260.

Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., Bianchi, A., 2015b. Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35:199–212.

Alfieri, L., Feyen, L., Di Baldassarre, G., 2016. Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies. *Climatic Change*, 136:507–521.

Alfieri, L., Dottori, F., Betts, R., Salamon, P., Feyen, L., 2018. Multi-Model projections of river flood risk in Europe under Global Warming. *Climate* 6, 16.

Arkell, B.P., Darch, G.J.C., 2006. Impact of climate change on London's transport network. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, 159:231–237.

Armengot-Serrano, R., 1994. Las precipitaciones extraordinarias. In: *Conselleria d'Obres Públiques, U.i.T.G.V. (Editor), Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana*, 98–99.

Barranco, L.M., Álvarez-Rodríguez, J., Olivera, F., Potenciano, A., Quintas, L., Estrada, F., 2014. Assessment of the Expected Runoff Change in Spain Using Climate Simulations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19:1481–1490.

Barredo, J.I., Salamon, P., Feyen, L., Dankers, R., Bódis, K., De Roo, A., 2008. Flood damage potential in Europe, JRC - European Commission, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy.

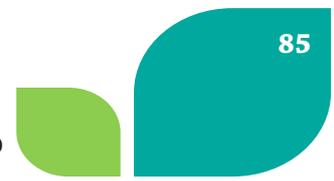
Barredo, J.I., 2009. Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Natural Hazards of Earth System Science*, 9(1):97–104.

Bell, V.A., Kay, A.L., Jones, R.G., Moore, R.J., 2007. Use of a grid-based hydrological model and regional climate model outputs to assess changing flood risk. *International Journal of Climatology*, 27:1657–1671.

Beniston, M., Stoffel, M., 2016. Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4°C and decrease thereafter. *Science of The Total Environment*, 571:228–236.

## Anejo 1.- Referencias bibliográficas

- Benito, G., Grodek, T., Enzel, Y., 1998. The geomorphic and hydrologic impacts of the catastrophic failure of flood-control-dams during the 1996-Biescas flood (central Pyrenees, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42:417-437.
- Benito, G., Barriendos, M., Llasat, C., Machado, M.J., Thorndycraft, V.R., 2005a. Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. In: Moreno, J.M. (Ed.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 527-548.
- Benito, G., Thorndycraft, V.R., 2005b. Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences. *Journal of Hydrology*, 313:3-15.
- Benito, G., Rico, M.T., Sánchez Moya, Y., Sopena, A., Thorndycraft, V.R., Barriendos, M., 2010. The impact of late Holocene climatic variability and land use change on the flood hydrology of the Guadalentín River, southeast Spain. *Global and Planetary Change*, 70:53-63.
- Benito, G., Machado, M.J., 2012. Floods in the Iberian Peninsula. In: Kundzewicz, Z.W. (Ed.), *Changes in flood risk in Europe*. IAHS and CRC Press/Balkema, Wallingford, UK, 372-383.
- Beguiría, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M., 2003. Assessing the Effect of Climate Oscillations and Land-use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32:283-286.
- Bloschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigao, R.A.P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Canjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbochova, L., Gul, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Khonova, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Sraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Zivkovic, N., 2017. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357:588-590.
- Brandão, C., Rodrigues, R., Pinto da Costa, J., 2001. Análise de fenómenos extremos precipitações intensas em Portugal Continental. *Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos*, Lisboa, Portugal.
- Capel, J., 1998. Modelos de circulación que afectan a la España atlántica y precipitaciones asociadas. *Revista de Geografía*, XXXII-XXXIII: 45-65.
- CCS, 2010. *Estadística de Riesgos Extraordinarios. Serie 1971-2009*. Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.
- CEDEX, 2010. *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua*. CEDEX, Madrid.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2003. Climate modeling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421:805-806.
- Clarke, M.L., Rendell, H.M., 2006. Effects of storminess, sand supply and the North Atlantic Oscillation on sand invasion and coastal dune accretion in western Portugal. *The Holocene*, 16:341-355.
- Corominas, J., 2005. Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. Riesgo de inestabilidad de Laderas. In: Moreno, J.M. (Ed.), *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por efecto del Cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 549-580.
- Costa, A.C., Santos, J.A., Pinto, J.G., 2012. Climate change scenarios for precipitation extremes in Portugal. *Theoretical and Applied Climatology*, 108:217-234.
- Dankers, R., Feyen, L., 2008. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113:D19.
- Dankers, R., Feyen, L., 2009. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114:D16.
- De Roo, A., Schmuck, G., Perdigao, V., Thielen, J., 2003. The influence of historic land use changes and future planned land use scenarios on floods in the Oder catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28:1291-1300.
- Dlugolecki, A., Lafeld, S., 2005. *Climate Change - Agenda for Action: The Financial Sector's Perspective*. Allianz Group and WWF, Munich, 59.
- Dlugolecki, A., 2008. *Climate Change and the Insurance Sector. The Geneva Papers on Risk and Insurance. Issues and Practice*, 33:71-90.
- Durão, R.M., del Barrio, G., Soares, A., 2010. Spatial-temporal dynamics of precipitation extremes in southern Portugal: a geostatistical assessment study. *International Journal of Climatology*, 30:1526-1537.
- EEA, 2017. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report*. In: Agency, E.E. (Editor), *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, 419.
- ERHIN, 2008. *Datos sobre la nieve y los glaciares en las cordilleras españolas. El programa Erhin (1984-2008)*, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- ERHIN, 2011. *Los glaciares del Pirineo español*, MAGRAMA, Madrid.



- Espejo, F., 2008. Hacia una tipología de inundaciones en la Cuenca del Ebro en función de sus causas atmosféricas. *Geographicalia*, 53:73–100.
- Fernández, J., Casanueva A., Montávez J., Gaertner M. A., Casado M. J., Manzanos R., and Gutiérrez J., 2017. Regional Climate Projections over Spain: Atmosphere. Future Climate Projections. In: Special Issue on climate over the Iberian Peninsula: an overview of CLIVAR-Spain coordinated science. CLIVAR Exchanges No. 73, September 2017. 45–52.
- Feyen, L., Dankers, R., Bódis, K., Salamon, P., Barredo, J.I., 2012. Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change*, 112:47–62.
- Gallego, M.C., Trigo, R.M., Vaquero, J.M., Brunet, M., García, J.A., Sigró, J., Valente, M. A., 2011. Trends in frequency indices of daily precipitation over the Iberian Peninsula during the last century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116:D2.
- Galván, R., Losada, J.A., Montesinos, S., Omedas Margelí, M., García, M., 2004. Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: Trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-EBRO. En: Conesa García, C. Álvarez Rogel Y. Martínez Guevara, J.B. (eds.), XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección, Murcia, Vol. 2, 207–218.
- García, J., Gallego, M.C., Serrano, A., Vaquero, J., 2007. Trends in Block-Seasonal Extreme Rainfall over the Iberian Peninsula in the Second Half of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, 20:113–130.
- Gil, A., Olcina, J., 1999. *Climatología Básica*. Colección Geografía: Ariel, Barcelona, Spain.
- Handmer, J., Honda, Y., Kundzewicz, Z.W., Arnell, N., Benito, G., Hatfield, J., Mohamed, I.F., Peduzzi, P., Wu, S., Shershtyukov, B., Takahashi, K., Yan, Z., 2012: Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 231–290.
- Hannaford, J., Marsh, T.J., 2008. High-flow and flood trends in a network of undisturbed catchments in the UK. *International Journal of Climatology*, 28:1325–1338.
- Hilker, N., Badoux, A., Hegg, C., 2009. The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. *Natural Hazards Earth System Science*, 9:913–925.
- IAHR, 2015. Summary of Recommendations for Policy-makers on adaptation to climate change in water engineering. *Hydrolink* 3:93–95.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14:563–578.
- Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, and S.S. Mwakilila, 2014: Freshwater resources. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229–269. Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A., Jones, R.G., 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92:41–63.
- Kundzewicz, Z.W., Radziejewski, M., Pinskiwar, I., 2006. Precipitation extremes in the changing climate of Europe. *Climate Research*, 31:51–58.
- Kundzewicz, Z.W., Kanae, S., Seneviratne, S.I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L.M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G.R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., Shershtyukov, B., 2014. Flood risk and climate change - global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59:1–28.
- Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., Huang, S., Milly, P.C.D., Stoffel, M.H., Driessen, P.P.J., Matczak, Piotr, Quevauviller, P., Schellnhuber, H.J., 2017. Differences in flood hazard projections in Europe - their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*, 62:1–14.
- Kyselý, J., 2009. Trends in heavy precipitation in the Czech Republic over 1961–2005. *International Journal of Climatology*, 29:1745–1758.

## Anejo 1.- Referencias bibliográficas

- Leckebusch, G.C., Koffi, B., Ulbrich, U., Pinto, J.G., Spanghel, T., Zacharias, S., 2006. Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research*, 31:59–74.
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., 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.
- López, J., Francés, F., 2013. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 3189–3203.
- Lionello, P., Dalan, F., Elvini, E., 2002. Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO<sub>2</sub> climate scenarios. *Climate Research*, 22:147–159.
- López de la Cruz, J., 2013. Análisis estadístico y modelación del régimen de las crecidas en ríos de la España Península en un contexto no estacionario. Tesis de Doctorado. Director: F. Francés. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J., 2012. Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414: 463–475.
- López-Moreno, J.I., García-Ruiz, J.M., 2004. Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *International Journal of Hydrological Science* 49:787–802.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., García-Ruiz, J.M., 2011. Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrological Earth System Science* 15:311–22.
- López-Moreno, J.I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S.M., Revuelto, M., Gilaberte, J., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M., Tague, C., 2014. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of The Total Environment*, 493:1222–1231.
- Łupikasza, E.B., Hänsel, S., Matschullat, J., 2011. Regional and seasonal variability of extreme precipitation trends in southern Poland and central-eastern Germany 1951–2006. *International Journal of Climatology*, 31:2249–2271.
- Machado, M.J., Botero, B.A., López, J., Francés, F., Díez-Herrero, A., Benito, G., 2015. Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 2561–2576.
- Maraun, D., Osborn, T.J., Gillett, N.P., 2008. United Kingdom daily precipitation intensity: improved early data, error estimates and an update from 2000 to 2006. *International Journal of Climatology*, 28:833–842.
- Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., Granados, A., 2014. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *Journal of Hydrology*, 517:1072–1088.
- MIMAM, 2000. El Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Moberg, A., Jones, P.D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., Alexander, L.V., Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., Yiou, P., Chen, D., Klein Tank, A.M.G., Saladié, O., Sigró, J., Aguilar, E., Alexandersson, H., Almarza, C., Auer, I., Barriendos, M., Begert, M., Bergström, H., Böhm, R., Butler, C.J., Caesar, J., Drebs, A., Founda, D., Gerstengarbe, F-W., Micela, G., Maugeri, M., Å-Sterle, H., Pandzic, K., Petrakis, M., Srncic, L., Tolasz, R., Tuomenvirta, H., Werner, P.C., Linderholm, H., Philipp, A., Wanner, H., Xoplaki, E., 2006. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111:D22.
- Mokrech, M., Kebede, A.S., Nicholls, R.J., Wimmer, F., Feyen, L., 2015. An integrated approach for assessing flood impacts due to future climate and socio-economic conditions and the scope of adaptation in Europe. *Climatic Change*, 128:245–260.
- Monjo, R., Gaitán, E., Pórtoles, J., Ribalaygua, J., Torres, L., 2016. Changes in extreme precipitation over Spain using statistical downscaling of CMIP5 projections. *International Journal of Climatology*, 36:757–769.
- Morán-Tejeda, E., Ignacio, L.-M., Antonio, C.-B., Sergio M, V.-S., 2011. Evaluating Duero's basin (Spain) response to the NAO phases: spatial and seasonal variability. *Hydrological Processes*, 25:1313–1326.
- Morata, A., 2014. Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 197.
- Mudelsee, M., Borngen, M., Tetzlaff, G., Grunewald, U., 2003. No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature*, 425:166–169.
- Munich\_Re, 2008. Special feature issue-Risk factor of air, Munich.
- Olcina Cantos, J., 2014. Riesgos climáticos y cambio climático. Evaluación del primer ciclo de planificación. Observatorio de las Políticas del Agua (OPPA). Fundación Nueva Cultura del Agua. 17. <https://fnca.eu/images/documentos/ODMA>
- Ollero, A., Pellicer, F., Sánchez-Fabre, M. 2004. “La crecida de febrero de 2003 en el curso medio del Ebro: análisis de su evolución espacio-temporal”. En Faus, M.C.(ed)



- Aportaciones geográficas en homenaje al Profesor Antonio Higuera Arnal. Zaragoza, Universidad de Zaragoza, 143–155.
- Pavan, V., Tomozeiu, R., Cacciamani, C., Di Lorenzo, M., 2008. Daily precipitation observations over Emilia-Romagna: mean values and extremes. *International Journal of Climatology*, 28:2065–2079.
- Petrow, T., Merz, B., 2009. Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology*, 371:129–141.
- Pinto, J.G., Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Spanghel, T., Reyers, M., Zacharias, S., 2007. Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 29:195–210.
- Piserra, M.T., Nájera, A., Lapieza, R., 2005. Impactos sobre el sector del seguro In: Moreno, J.M. (Ed.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio climático*. Ministerio de Medioambiente, Madrid, 691–726.
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Sauquet, E., Prudhomme, C., Parey, S., Paquet, E., Neppel, L., Gailhard, J., 2008. Regional methods for trend detection: Assessing field significance and regional consistency. *Water Resources Research*, 44: W08419.
- Río, S.D., Herrero, L., Fraile, R., Penas, A., 2011. Spatial distribution of recent rainfall trends in Spain (1961–2006). *International Journal of Climatology*, 31:656–667.
- River Bureau 2010. *Practical Guidelines on Strategic Climate Change Adaptation Planning –Flood Disasters*. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan. <http://www.mlit.go.jp/river>.
- Robson, A.J., Jones, T.K., Reed, D.W., Bayliss, A.C., 1998. Study of national trend and variation in UK floods. *International Journal of Climatology*, 18:165–182.
- Rodda, J.C., Little, M.A., Rodda, H.J.E., McSharry, P.E., 2010. A comparative study of the magnitude, frequency and distribution of intense rainfall in the United Kingdom. *International Journal of Climatology*, 30:1776–1783.
- Rodrigo, F.S., Trigo, R.M., 2007. Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002. *International Journal of Climatology*, 27:513–529.
- Rodrigo, F.S., 2010. Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 30:1512–1525.
- Rodríguez-Lloveras, X., Bussi, G., Francés, F., Rodríguez-Caballero, E., Solé-Benet, A., Calle, M., Benito, G., 2015. Patterns of runoff and sediment production in response to land-use changes in an ungauged Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 531:1054–1066.
- Sánchez Fabre, M., Ballarín Ferrer, M.D., Ollero, A., Serrano-Notivol, R., Saz, M., 2015. Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI. En: de la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación: Universidad de Zaragoza-AGE*, 1853–1862.
- Sayers, P.B., Horritt, M., Penning Rowsell, E., Fieth, J., 2017. Present and future flood vulnerability, risk and disadvantage: A UK scale assessment. A report for the Joseph Rowntree Foundation published by Sayers and Partners LLP.
- Schmidt, M., Dehn, M., 2003. Examining Links Between Climate Change and Landslide Activity Using GCMs, *Linking Climate Change to Land Surface Change*, 123–141.
- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.
- Silva, A.T., Portela, M.M., Naghettini, M., 2012. Nonstationarities in the occurrence rates of flood events in Portuguese watersheds. *Hydrological Earth System Science*, 16:241–254.
- Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F.G., Wanner, H., Luterbacher, J., 2010. Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards Earth System Science*, 10:1037–1050.
- Ugarte, F.M., González, J.A., 1984. Precipitaciones de agosto de 1983 en la cuenca del río Oka (ría de Mundaka-Vizcaya): repercusiones geomorfológicas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10:201–214.
- Ulbrich, U., Pinto, J.G., Kupfer, H., Leckebusch, G.C., Spanghel, T., Reyers, M., 2008. Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations. *Journal of Climate*, 21:1669–1679.
- Uppala, S.M., Kållberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Va-

- siljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131:2961–3012, doi:doi:10.1256/qj.04.176
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M.A., Tenza-Abril, A.J., 2017. Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology* 37:1285–1296.
- Vormoor, K., Lawrence, D., Schlichting, L., Wilson, D., Wong, W.K., 2016. Evidence for changes in the magnitude and frequency of observed rainfall vs. snowmelt driven floods in Norway. *Journal of Hydrology*, 538:33–48.
- Zolina, O. et al., 2008. Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113:D6.
- Referencias bibliográficas de la revisión de la adaptación al cambio climático por parte de Europa**
- CEDEX, 2010. Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua., CEDEX, Madrid.
- Döll, P. Jiménez-Cisneros B. Oki T., Arnell N.W., Cogley J.G., Benito G., Kundzewicz Z.W., Mwakalila S., Jiang T. (2015). Integrating risks of climate change into water management. *Hydrological Sciences Journal*, 60 (1), 4-13.
- Handmer, J., Y. Honda, Z.W. Kundzewicz, N. Arnell, G. Benito, J. Hatfield, I.F. Mohamed, P. Peduzzi, S. Wu, B. Sherstyukov, K. Takahashi, and Z. Yan, 2012: Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 231-290.
- European Commission, 2015: The Water Framework Directive and the Floods Directive: Actions towards the 'good status' of EU water and to reduce flood risks. Report on the progress in implementation of the Floods Directive. Commission Staff Working Document, Brussels, 82 pp.
- EWGF (European Working Group on Floods), 2017: Climate Change. Report on the Full Workshop of the Working Group on Floods. National Institute of Hydrology and Water Management. Bucharest, 14-15 March, 2017. 34 pp.
- Goergen, K., Beersma, J., Hoffmann, L. and J. Junk, 2013. ENSEMBLES-based assessment of regional climate effects in Luxembourg and their impact on vegetation. *Climatic Change* 119: 761-773.
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC, 2014: *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, and S.S. Mwakalila, 2014: Freshwater resources. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
- Junta administrativa de Västernorrland, Suecia: <http://www.lansstyrelsen.se/vasternorrland/Sv/Pages/default.aspx>
- Kont, A., Jaagus, J. and R. Aunap, 2003. Climate change scenarios and the effect of sea-level rise for Estonia. *Global and Planetary Change* 36 (1-2): 1-15.
- Kundzewicz, Z. W. , Kanae S., Seneviratne, S.I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler R., Bouwer L.M., Arnell N., Mach K., Muir-Wood R., Brakenridge G. R., Kron W., Honda Y., Benito G., Takahashi K., Sherstyukov B., 2014. Flood risk and climate change - global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (1), 1-28.
- Nilson, A., Kiviste1, A., Korjus, H., Mihkelson, S., Etverk, I. and T. Oja, 1999. Impact of recent and future climate change on Estonian forestry and adaptation tools. *Cl-*



mate Research 12: 205-214.

Protección Civil y Preparación, en Suecia: <https://msb.se>

Radulescu, D., 2017: Climate Change - methods and processes planned for the 2nd cycle and Adaptation strategy. Findings from the Questionnaire. Presentation at the European Working Group on Floods, Bucharest, 14-15 March, 2017. 17 pp.

Sayers, P.B., Horritt, M.S., Penning-Rowell, E. and McKenzie, A., 2017. Climate Change Risk Assessment 2017. Projections of future flood risk in the UK. 125 pp.

Visor de zonas inundables de Irlanda del Norte, Reino Unido. Rivers Agency: <http://dfi-ni.maps.arcgis.com>

### Referencias bibliográficas de la aproximación metodológica desarrollada por España para la evaluación de la influencia del cambio climático en el riesgo de inundación

Acín, V., Ballarín, D., Brufao, P., Domenech, S., Espejo, F., González, J.C., Granado, D., Ibisate, A., Marcén, C., Mora, D., Nadal, E., Ollero, A., Sánchez, M., Serrano, R., 2012. Sobre las precipitaciones de octubre de 2012 en el Pirineo aragonés, su respuesta hidrológica y la gestión de riesgos. *Geographicalia* 61, 101-128

Agencia Catalana del Agua

Allen, R.G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, Italia.

Allen, R.G.; L. S. Pereira y D. Raes (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56 (página 45).

Barettino, D., Pujadas, J., 1992. Estudio de avenidas en la cuenca alta del río Francolí (Tarragona). Mapas de Peligrosidad por inundaciones. IGME- programa de I+D en geología ambiental. 74pp + anexos.

Benito, G., Macklin, M.G., Zielhofer, C., Jones, A.F., Machado, M.J., 2015. Holocene flooding and climate change in the Mediterranean. *Catena* 130: 13-33.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol.30(1) pp:1-10

Bussi, G., F. Francés, J. L. Salinas, R. García-Bartual, L. Pujol, V. Guna y E. Ortíz. 2012. Estimación de Mapas de Peligrosidad mediante generación de tormentas sintéticas. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, Septiembre 2012.

Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O.B., Goergen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C. y Vautard, R. (2015): Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Climate Dynamics*, 47 (3), 719-737.

Chen, J.; Brissette, F.P.; Leconte, R. (2012) WeaGETS-A Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. *Proc. Environ. Sci.* 2012, 13, 2222-2235. [CrossRef]

Chen, J. & Fracis, P. (2014) Comparison of five stochastic weather generators in simulating daily precipitation and temperature for the Loess Plateau of China. *Int. J. Climatol.* 34: 3089-3105 (2014)

Christensen, J.H., et al. (2007): Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Clavero Paricio, P. L. (1994): Tipos de Climas. En: *Atlas climático de la Comunidad Valenciana (1961-1990)* (Coord: Pérez Cueva, A. J.), Generalitat Valenciana, Conselleria d'Obres públiques, Urbanisme i Transport, Valencia, 118-121.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX. Anuario de Aforos

Centro Nacional de Información Geográfica, CNIG

Confederación Hidrográfica del Cantábrico

Confederación Hidrográfica del Ebro

Confederación Hidrográfica del Júcar

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Déqué, M., Somot, S., Sánchez-Gómez, E., Goodess, C.M., Jacob, D., Lenderink, G. and Christensen, O.B. (2012): The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability. *Climate Dynamics*, 38(5-6):951-964.

Duan, Q., Gupta, V.K., & Sorooshian, S. (1993). A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optimiz. Theory Applic* 76, 501-521.

EHRIN, programa para la Evaluación de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación

European Soil Database (ESDB)

FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resources,

## Anejo 1.- Referencias bibliográficas

- by ISSS-ISRIC-FAO. World Soil Resources Report No. 84. Rome.
- Fernández, J. and Sáenz, J. (2003). Improved field reconstruction with the analog method: searching the CCA space. *Clim. Res.*, 24:199-213.
- Francés, F. y Benito, J., 1995. La modelación distribuida con pocos parámetros de las crecidas. *Ingeniería del Agua*, 2(4), 7-24.
- Francés, F.; Vélez J. J.; Vélez J. I. y Puricelli, M. 2002. Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain. En congreso: Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. Las Vegas, USA. Julio. Publicado en CD.
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 226-240.
- Francés, F., R.García-Bartual, G. Bussi. 2011. High return period annual maximum reservoir water level quantiles estimation using synthetic generated flood events. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management: Proceedings of the 3rd International Forum on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management (3iwrdd-forum)*, Valencia (Spain). Editors: I. Escuder-Bueno, E. Matheu, L. Altarejos-García, J. Castillo-Rodríguez. October 2011.
- Gaertner, M.A., Gutiérrez, J.M., Castro, M. (2012): Escenarios regionales de cambio climático. *Revista Española de Física*, 26, pp. 34-42.
- García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Serrano-Vicente SM, Beguería S, Lasanta T., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Sci Rev* 105(3-4):121-39.
- Giorgi F, Jones C. y Asrar G. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin* 58(3), 175-183.
- Gutiérrez, J.M. et al. (2017). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*.
- Gutjahr, O. and Heinemann, G. (2013): Comparing precipitation bias correction methods for high-resolution regional climate simulations using COSMO-CLM, *Theoretical and Applied Climatology*, 114, 511-529.
- Herrera, S. (2011). Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España. Universidad de Cantabria.
- Herrera, S., J. Fernández, and J. M. Gutiérrez. 2016. Update of the Spain02 Gridded Observational Dataset for EURO-CORDEX Evaluation: Assessing the Effect of the Interpolation Methodology. *International Journal of Climatology* 36 (2):900-908.
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geológico Nacional (MAGNA) y Mapa Litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- Jacob, D., et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2):563-578
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., 2006. The Mediterranean climate: an overview of the main characteristics and issues. Elsevier, Netherlands.
- Llasat, M.C., Puigcerver, M., 1990. Cold air pools over Europe. *Meteorog. Atmos. Phys.* 42, 171-177
- López-Moreno JI, García-Ruiz JM, Beniston M., 2008. Environmental change and water management in the Pyrenees. Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global Planet Change* 66(3-4):300-12.
- Mapa de caudales máximos en régimen natural, CAUMAX
- Mehan, S, Guo, T., Gitau, M & Flanagan, C. (2017) Comparative Study of Different Stochastic Weather Generators for Long-Term Climate Data Simulation. *Climate* 2017, 5, 26; doi:10.3390/cli5020026
- Nash, I.E., & Sutcliffe, I.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nicks, A.D.; Lane, L.J.; Gander, G.A. Chapter 2. Weather generator. In *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*; NSERL Report #10; USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, IN, USA, 1995.
- Panofsky, H.A. and Wilson, B.G. (1968): Some applications of statistics to meteorology. University Park : Penn. State University, College of Earth and Mineral Sciences.
- Pérez Cueva, A. J. (1994): Los climas de los valles del Túria y Palancia. En: *Atlas climático de la Comunidad Valenciana (1961-1990)* (Coord: Pérez Cueva, A. J.), Generalitat Valenciana, Conselleria d'Obres públiques, Urbanisme i Transport, Valencia, 126-129.



- Ramírez Solano, L.M. (2012). Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España. Tesina. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ruane, A.C., and McDermid, S.P. (2017): Selection of a Representative Subset of Global Climate Models That Captures the Profile of Regional Changes for Integrated Climate Impacts Assessment. *Earth Perspectives* 4 (1):1
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126, 265-267.
- Saxton, K. E. and W. J. Rawls (2006). "Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions". *Soil Science Society of America* 70: 1569 - 1578.
- Semenov, M.A.; Barrow, (2002). *E.M. LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies; User Manual*: Hertfordshire, UK, 2002.
- Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)
- Stöckle, C.O.; Campbell, G.S.; Nelson, R. *Climgen Manual*; Biological Systems Engineering Department, Washington State University: Pullman, WA, USA, 1999.
- Vélez, J. J.; Vélez J. I. y Francés, F. 2002. Simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas mediante el uso de la modelación distribuida. En congreso: 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Ed. UPV. Valencia, España. Febrero 7-8. 1682-1687.
- Vélez, J. J., M. Puricelli, F. López Unzu, and F. Francés. 2009. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 2: 229-246
- Vilà i Valentí, J., 1990. *Climatología y medio ambiente. Homenaje al profesor Luis Miguel Albertosa Sánchez*. Universitat de Barcelona, pp.616. ISBN: 978-84-7875-198-3
- Weigel, A.P., Knutti, R., Liniger, M.A., and Appenzeller, C. (2010): Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections. *Journal of Climate* 23 (15):4175-4191
- Wilcke, R.A.I., Mendlik, T., and Gobiet, A. (2013): Multi-variable error correction of regional climate models. *Climatic Change*, 120, 871-887.
- Zahn, M. and von Storch, H. (2010): Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. *Nature*, 467, 309-312.



## Anejo 2

# Proyecciones de RCMs del proyecto EURO-CORDEX disponible en la web de AEMET para las distintas Demarcaciones Hidrográficas

### Proyecciones de RCMs del proyecto EURO-CORDEX disponible en la web de AEMET para las distintas Demarcaciones Hidrográficas

Se han recopilado las proyecciones medias procedentes de modelos RCM y downscaling dinámico con EURO-CORDEX disponibles en la Web de AEMET para las diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Los datos corresponden a cambios anuales en la precipitación extrema respecto al periodo de control (1976-2005) para 10 RCMs y dos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 / RCP 8.5), que se han dividido en tres horizontes temporales (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100).

En este anexo se presenta el análisis de la moda y la mediana en el porcentaje de cambio anual en las proyecciones EURO-CORDEX de lluvias intensas (10 modelos RCMs x 30 años periodo temporal).

La mayor parte de las cuencas hidrográficas presentan la moda de la matriz de datos entre el 4 y el 7%, que sería coherente con los cambios del 4% en la

precipitación máxima que algunos autores sugieren aplicar en aquellas regiones del contexto español donde no se disponga de datos robustos de proyección de lluvias intensas.

A continuación se muestra el cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas.

En las cuencas del sur peninsular (Mediterráneas Andaluzas, Júcar, Guadalquivir y Segura), existen cambios de signo en la moda que muestra la elevada variabilidad anual en el porcentaje de cambio en las lluvias intensas. Por su parte, la mediana de los valores de porcentaje de cambio en la lluvia máxima resulta coherente en signo y aumento relativo entre los diferentes horizontes temporales, con cambios medios entre 3-6% para el periodo 2070 y entre 4-10% para el periodo 2100. Los mayores cambios se encuentran en las cuencas Atlánticas y los menores se generan en la Demarcación del Cantábrico y regiones mediterráneas.

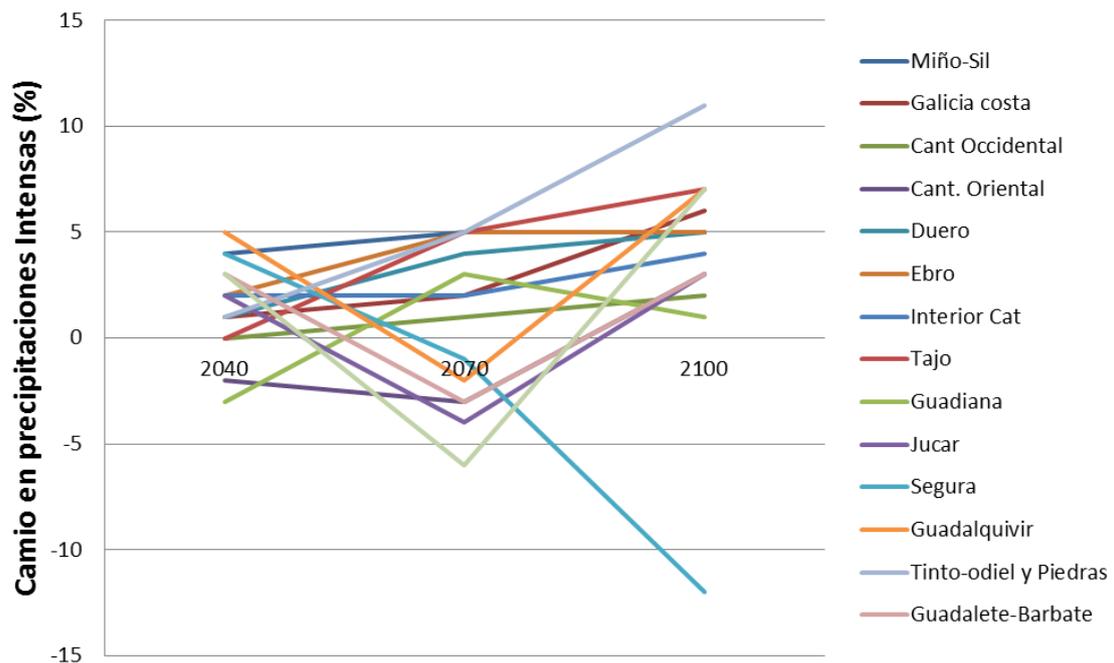
## Anejo 2.- Proyecciones de RCMs del proyecto EURO-CORDEX disponible en la web de AEMET para las distintas CCHH

Valor de la moda correspondiente a la matriz de valores de cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EURO-CORDEX.

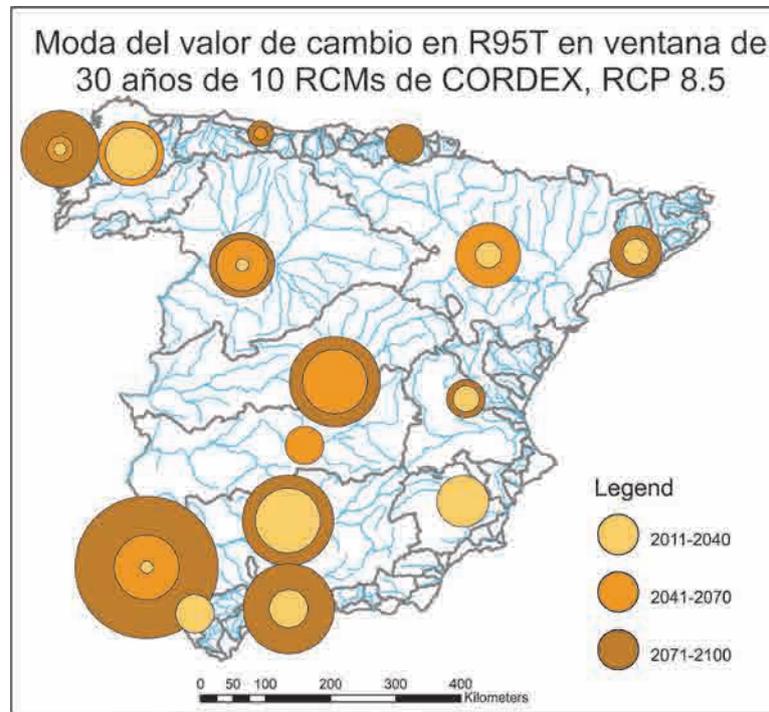
Longitud	Latitud	Moda del valor de cambio % R95T	2040	2070	2100
128133	4771346	Miño-Sil	4	5	5
19152	4778267	Galicia-Costa	1	2	6
327313	4802165	Cant Occidental	0	1	2
548747	4786678	Cant. Oriental	-2	-3	3
298767	4598960	Duero	1	4	5
676533	4614247	Ebro	2	5	5
903577	4619000	Cuencas Internas de Cataluña	2	2	4
441440	4418697	Tajo	0	5	7
394331	4319980	Guadiana	-3	3	1
576128	4379647	Júcar	2	-4	3
637424	4233573	Segura	4	-1	-12
368935	4204315	Guadalquivir	5	-2	7
152370	4131491	Tinto, Odiel y Piedras	1	5	11
226453	4059921	Guadalete-Barbate	3	-3	3
370254	4067330	Cuencas Mediterráneas Andaluzas	3	-6	7

Moda del valor de cambio de la matriz de valores anuales de % de cambio de la lluvia extrema escenario de emisiones RCP 4.5 / RCP 8.5 en la matriz de datos de 30 años (ventana temporal) generados con 10 modelos de clima regional. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.

### Moda del valor de cambio (10 modelos x 30 años)



Distribución espacial de los cambios por Demarcaciones Hidrográficas, para los tres horizontes temporales. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.

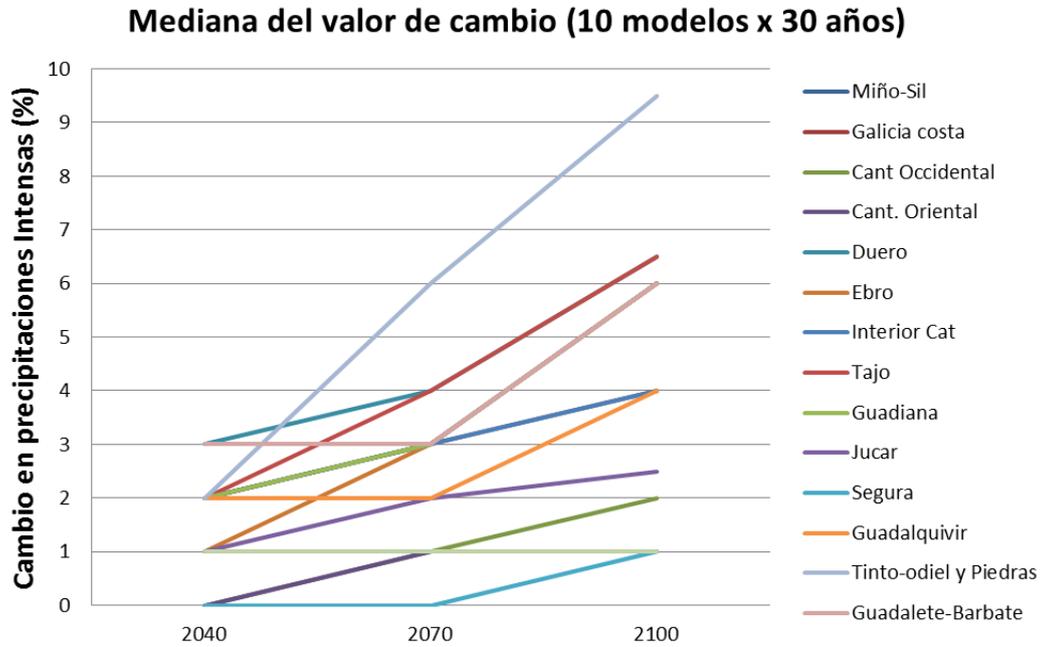


Valor de la mediana correspondiente a la matriz de valores de cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.

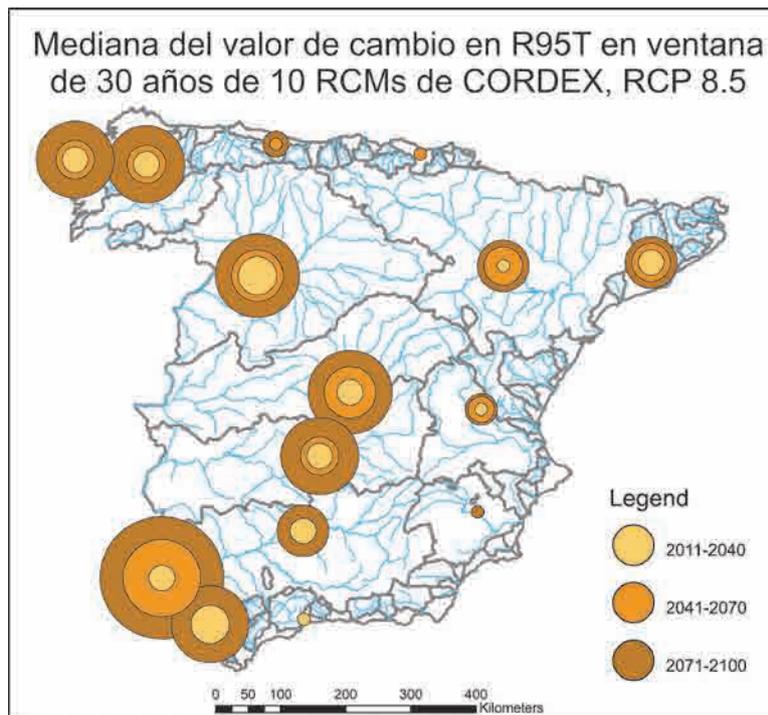
Longitud	Latitud	Moda del valor de cambio % R95T	2040	2070	2100
128133	4771346	Miño-Sil	2	3	6
19152	4778267	Galicia-Costa	2	3	6
327313	4802165	Cant Occidental	0	1	2
548747	4786678	Cant. Oriental	0	1	1
298767	4598960	Duero	3	4	6.5
676533	4614247	Ebro	1	3	4
903577	4619000	Cuencas Internas de Cataluña	2	3	4
441440	4418697	Tajo	2	4	6.5
394331	4319980	Guadiana	2	3	6
576128	4379647	Júcar	1	2	2.5
637424	4233573	Segura	0	0	1
368935	4204315	Guadalquivir	2	2	4
152370	4131491	Tinto, Odiel y Piedras	2	6	9.5
226453	4059921	Guadalete-Barbate	3	3	6
370254	4067330	Cuencas Mediterráneas Andaluzas	1	1	1

**Anejo 2.- Proyecciones de RCMs del proyecto EURO-CORDEX disponible en la web de AEMET para las distintas CCHH**

Mediana del valor de cambio de la matriz de valores anuales de % de cambio de la lluvia extrema escenario de emisiones RCP 4.5 / RCP 8.5 en la matriz de datos de 30 años (ventana temporal) generados con 10 modelos de clima regional. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.



Distribución espacial de los cambios por Demarcaciones Hidrográficas, para los tres horizontes temporales. Datos AEMET, procedentes del downscaling dinámico de EUROCORDEX.



## Anejo 3

# Gráficos de evolución del cambio en las precipitaciones intensas para las distintas cuencas hidrográficas (regionalización AR5-IPCC)

### Gráficos de evolución del cambio en las precipitaciones intensas para las distintas cuencas hidrográficas (regionalización AR5-IPCC)

En estas figuras se muestra el porcentaje de cambio anual de las precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1971-2010), usando múltiples modelos globales y regionales de clima (ver web AEMET para detalles).

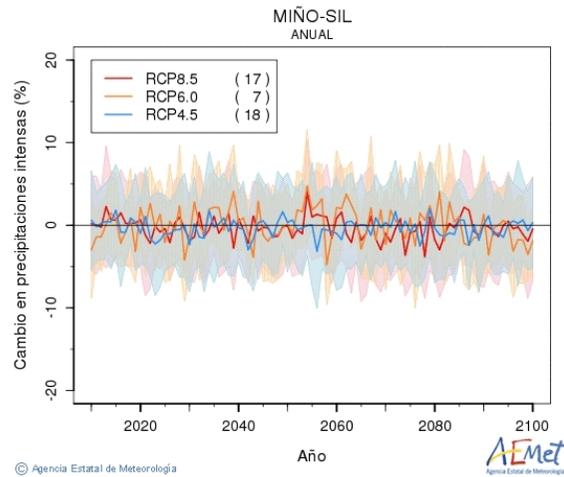
A los resultados de estos modelos se les ha aplicado un downscaling estadístico de regionalización de análogos y técnicas estadísticas de regresión, un downscaling de regionalización dinámica (EURO-CORDEX).

Los valores anuales de downscaling aparecen en la zona sombreada con colores, y sus valores medios correspondientes a diferentes escenarios de emisión se han dibujado con líneas de colores (azul: RCP 4.5 / RCP 8.5; naranja: RCP6.0; rojo: RCP 4.5 / RCP 8.5).

De forma visual, se pueden observar las tendencias para las diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Se muestra cómo la técnica de downscaling afecta a la tendencia temporal de los resultados, siendo más evidentes las tendencias mediante la regionalización estadística de regresión. Los resultados de regionalización dinámica CORDEX muestran en general mayores cambios durante el periodo 2071-2100 en la mayor parte de las Demarcaciones. Estos datos de CORDEX han sido utilizados para determinar los valores máximos de R95T para cada periodo, y los valores de la moda y la mediana para la matriz de datos correspondientes a los 10 RCMs y la ventana temporal correspondiente (30 años); por tanto, se trata de los estadísticos de una matriz con 300 datos en cada horizonte temporal (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100).

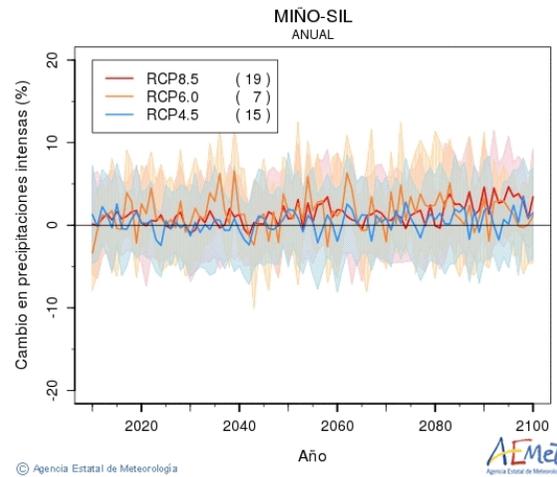
### Anejo 3.- Gráficos de evolución del cambio en las precipitaciones intensas para las distintas cuencas hidrográficas (regionalización AR5-IPCC)

#### REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

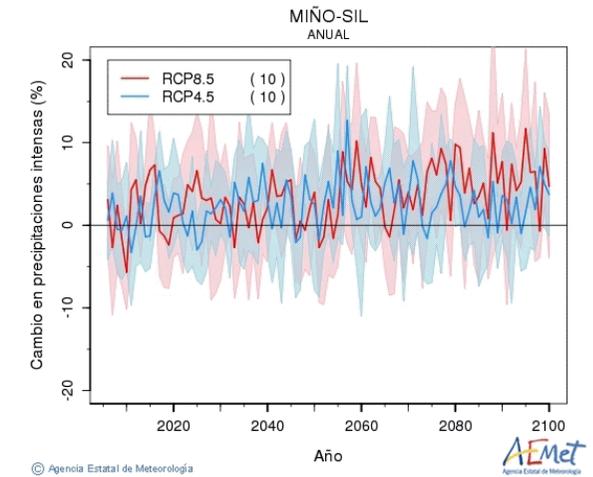


#### REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN

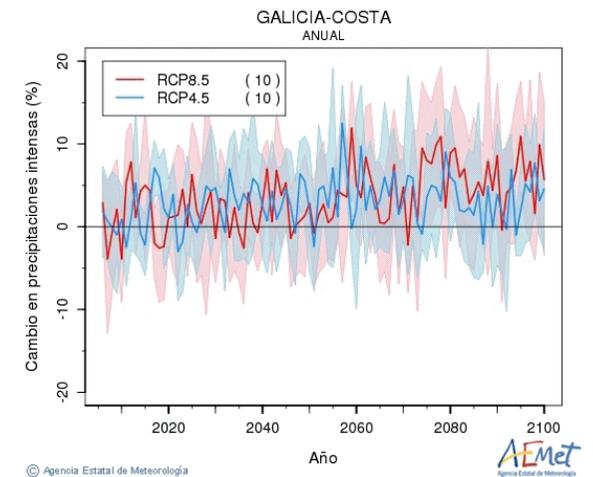
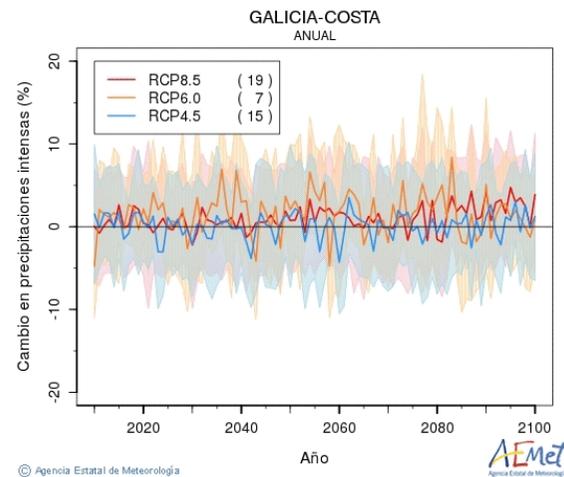
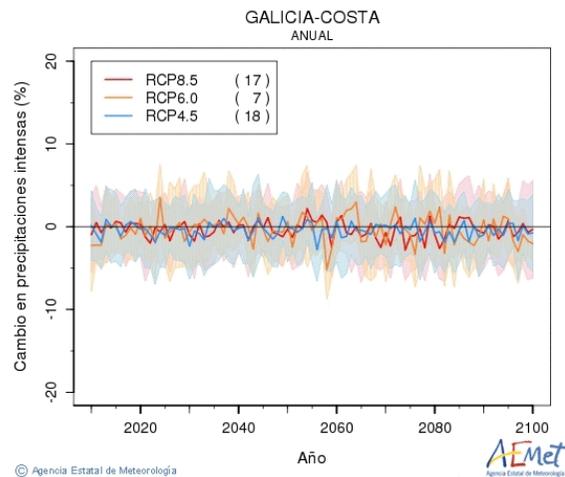
Miño-Sil: Neira, Sil, Arnoya, Aveda, Tea, Louro; Bibei, Navea, Lor, Cabe.



#### REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX



Galicia-Costa: Anllóns, Castro, Condomiñas, De las Mesetas, Eo, Eume, Ferreiras, Grande del Puerto, Xallas, Jubia, Lambre, Landrove, Lerez, Verdugo.

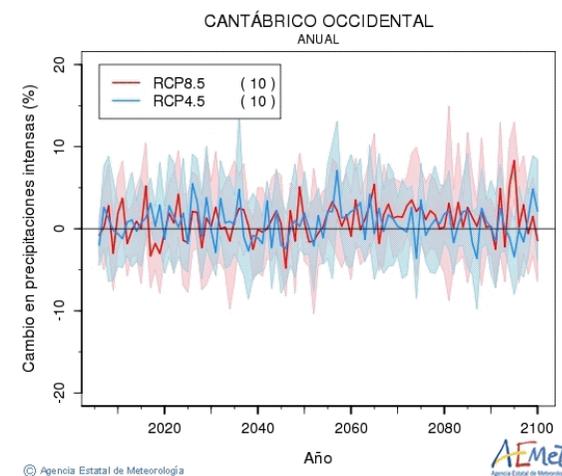
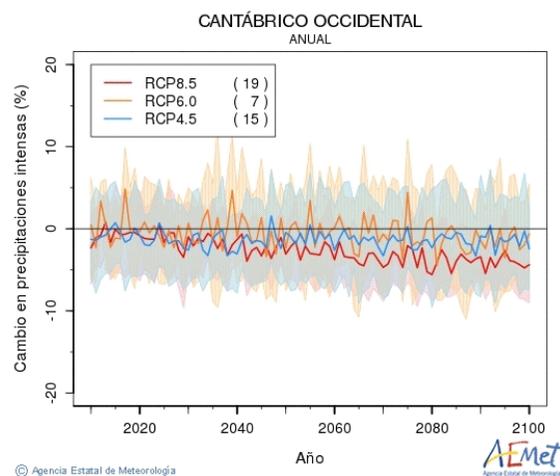
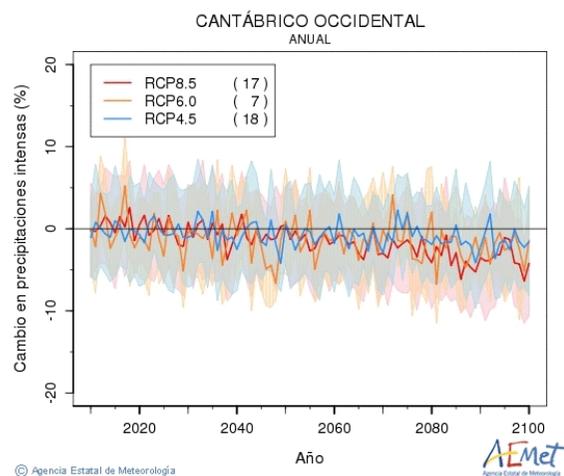


## REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

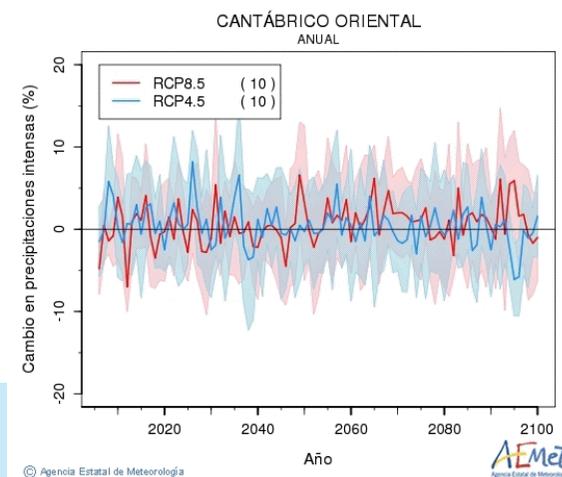
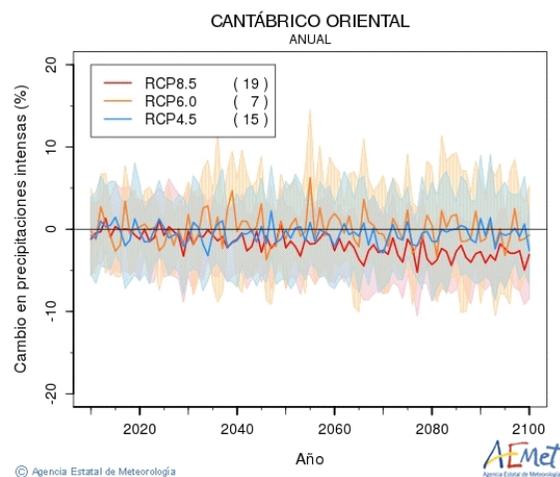
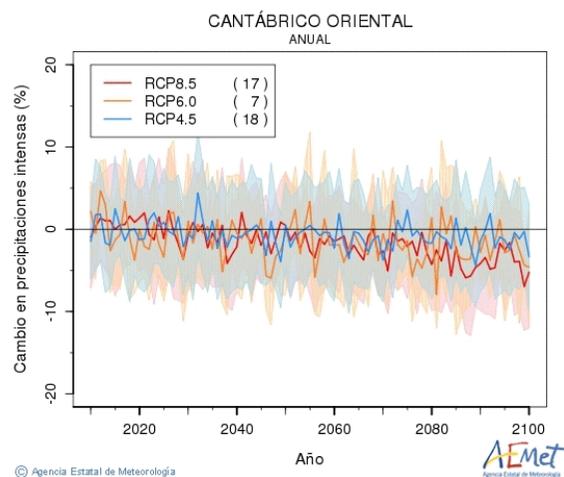
## REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN

## REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX

Cantábrico Occidental: Agüera, Alvares, Asón, Bedón, Besaya, Cares, Caudal, Deva, Eo, Escudo, Esva, Ibias, Linares, Miera, Nalón, Nansa, Narcea, Navia, Nora, Pas, Pigüena, Piles, Piloña, Porcia, Saja, Sella, Trubia.



Cantábrico oriental: Aritzacun, Urritzate, Bidasoa, Luzaide, Nervión, Olaveida, Oria, Urumea.



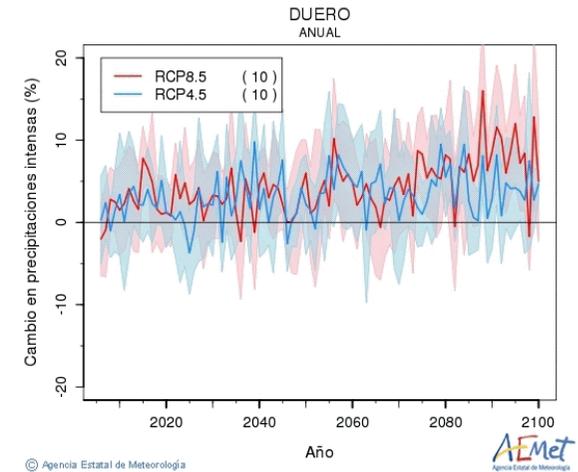
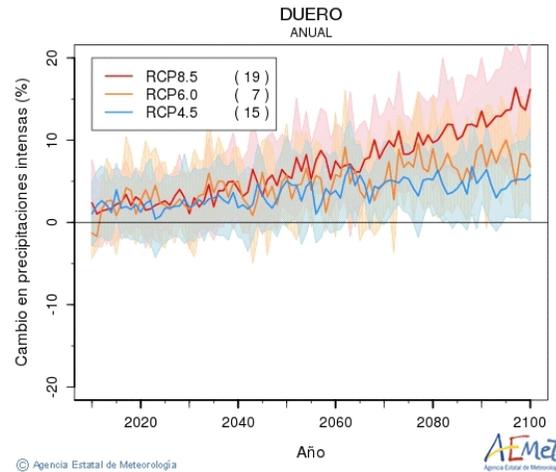
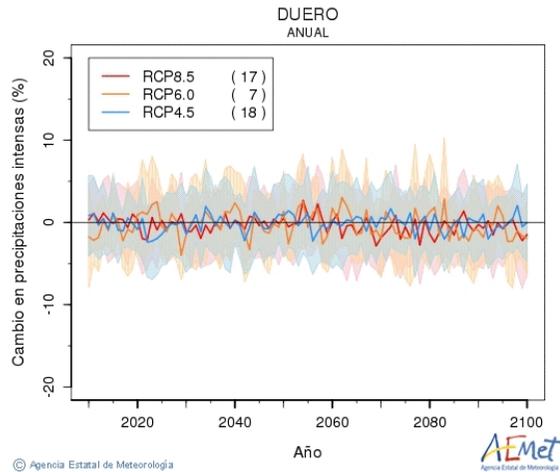
### Anejo 3.- Gráficos de evolución del cambio en las precipitaciones intensas para las distintas cuencas hidrográficas (regionalización AR5-IPCC)

#### REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

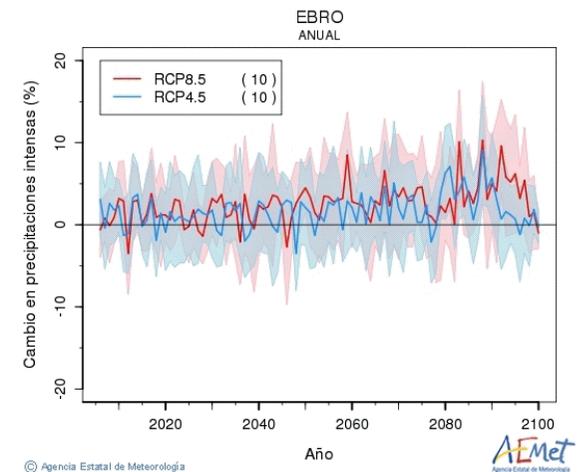
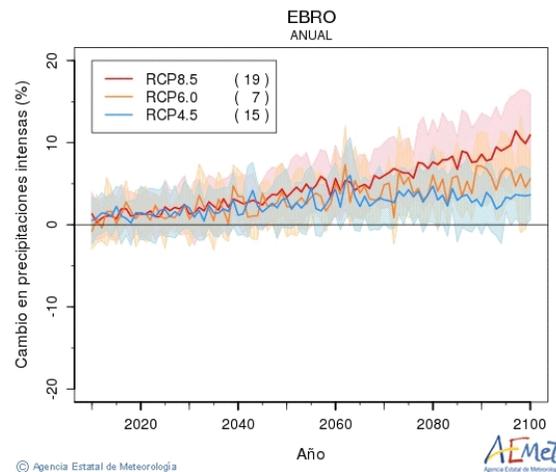
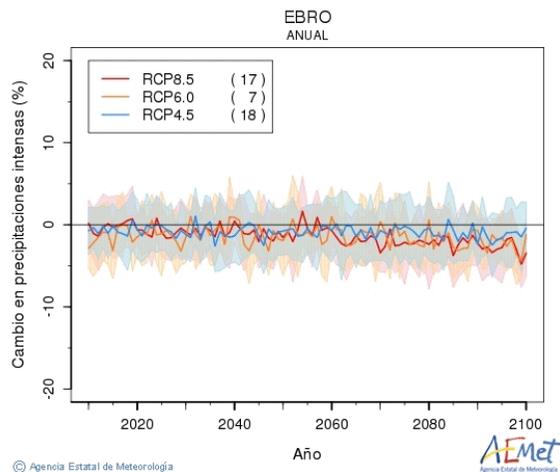
#### REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN

#### REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX

Duero: Támega, Tuella, Aliste, Tera, Duerna, Éria, Luna, Omañas, Órbigo, Tuerto, Bernesga, Cea, Curueño, Esla, Porma, Sequillo, Torío, Valderaduey, Carrión, Cueva, Ucieza, Valdeginete, Esgueva, Odra, Pisuerga, Valdavia, Arlanza, Arlanzón, Rituerto, Ucerro, Rieza, Adaja, Arelavillo, Cega, Eresma, Pirón, Voltoya, Bajoz, Guareña, Trabancos, Zapardiel, Almar, Alhándiga, Aravalle, Corneja, Tormes, Valmuza, Agadún, Agueda, Camaces.



Ebro: Aragón, Cinca, Ebro, Gállego, Guadalupe, Jalón, Segre, Nela, Jerea, Oca, Tirón, Byas, Zadoya, Ega, Arga, Najerilla, Iregua, Cidacos, Linares, Alhama, Añamaza, Iratí, Arba, Jalba, jiloca, Piedra, Mesa, Ortiz, Huerva, Martín, Bergantes, Matarraña, Ara, Esera.

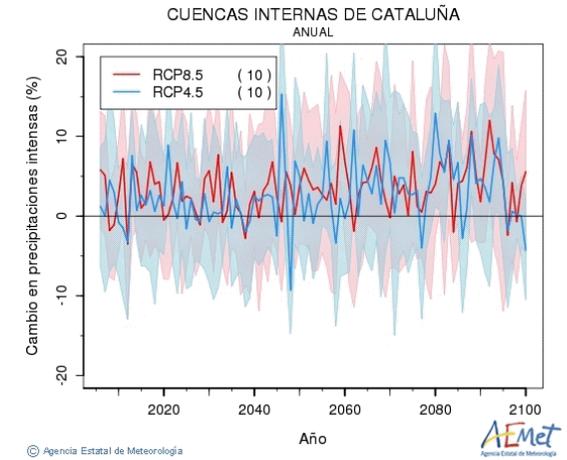
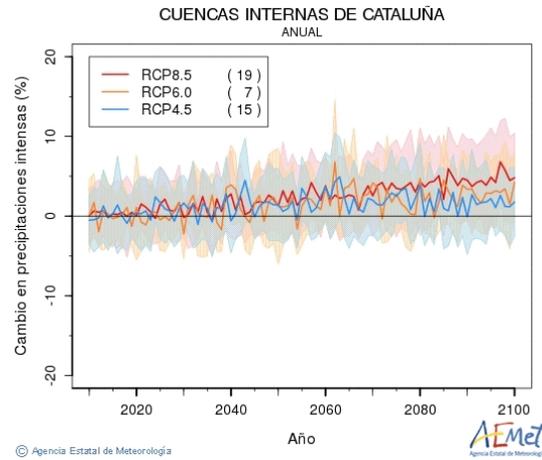
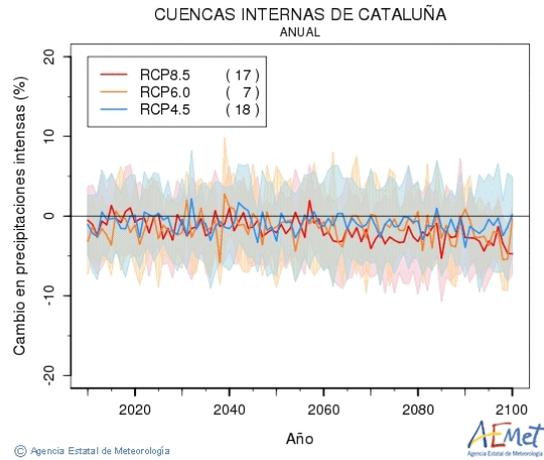


## REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

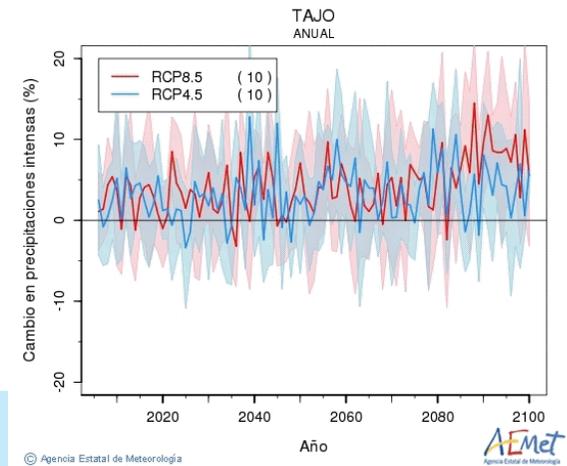
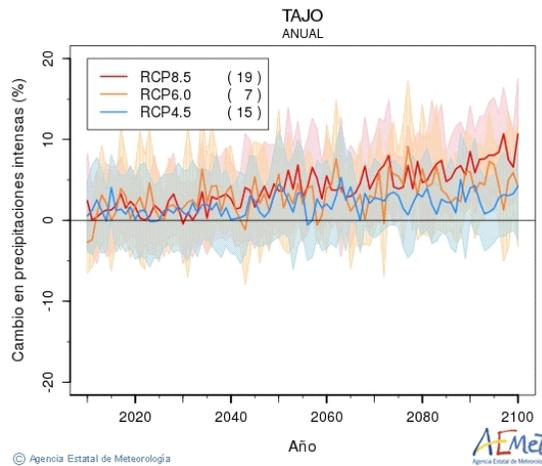
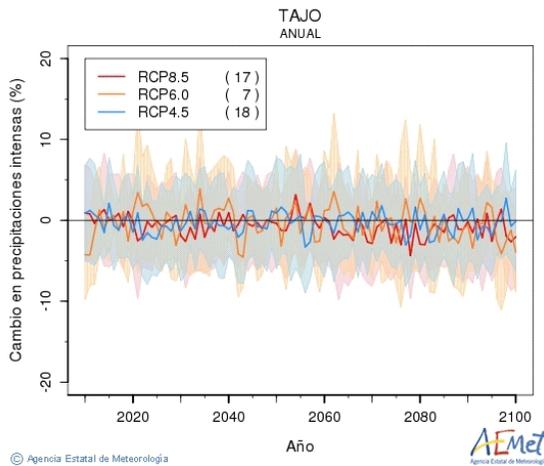
## REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN

## REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX

Cuencas Internas de Cataluña: Llobregat, Ter, Muga, Daró, Fluviá, Francolí, Foix, Gayá, Riudecañas.



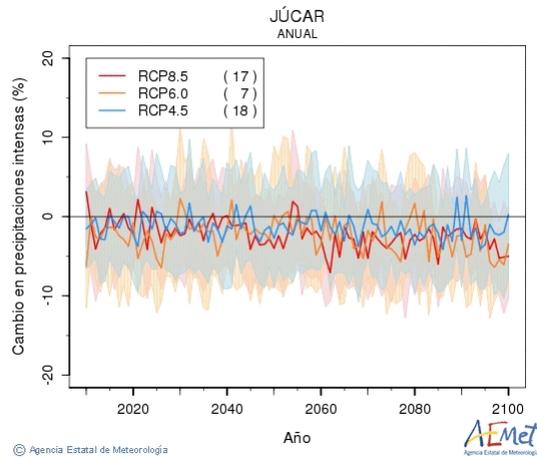
Tajo: Tajo, Tajuña, Ungría, Peñón, Henares, Dulce, Salado, Hoz, Cercadillo, Frío, Cañamares, Bornova, Sorbe, Riatillo, Aliendre, Badiel, Torote, Alagón, Jarama, Jaramilla, Lozoya, Valle, Puebla, Guadalix, Veguillas, Navacerrada, Manzanares, Canencia, Vatorrón, Viñuelas, Manina, Meaques, Culebro, Trofa, Guadarrama, Aulencia, Guatel, Alberche, Tiétar, Gévalo, Ibor, Gualija, Viejas, Tiétar, Alberche, Salor, Almonte, Guadiela, Gallo, Algodor, Manzanares.



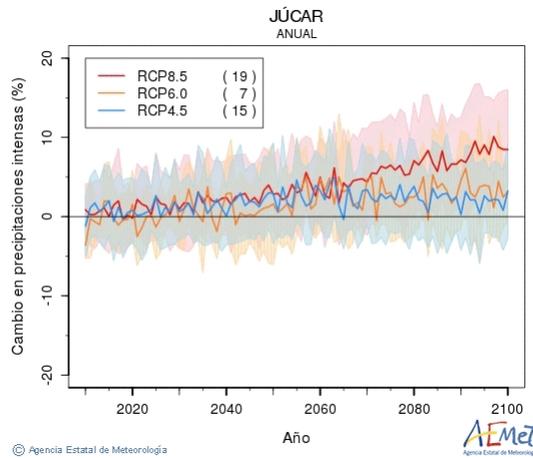
### Anejo 3.- Gráficos de evolución del cambio en las precipitaciones intensas para las distintas cuencas hidrográficas (regionalización AR5-IPCC)

#### REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

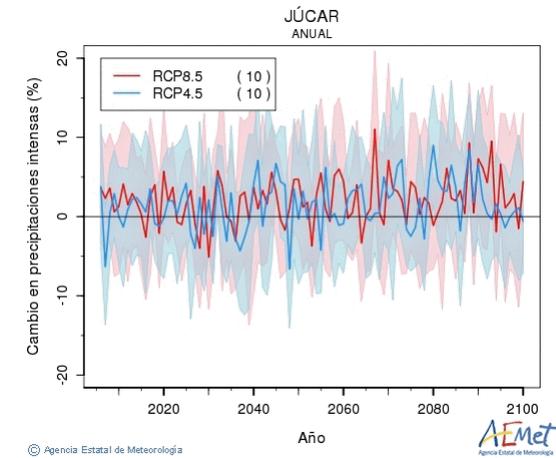
Júcar: Albaida, Escalona, los Santos, Gritos, Cabriel, Cãnoles, Clariano, Guadazaón, Argongaña, Huécar, Sellent, Magro, Moscas, los Ojos, Valdemembra.



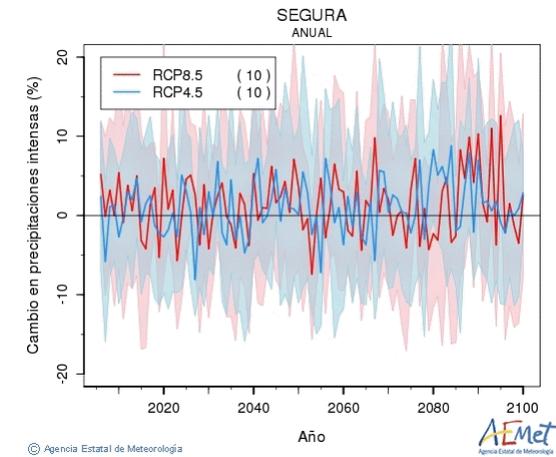
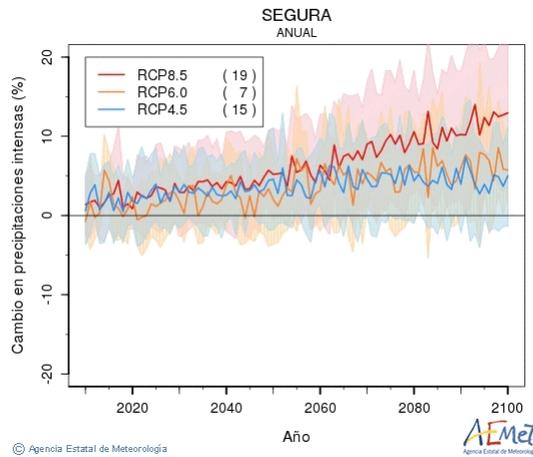
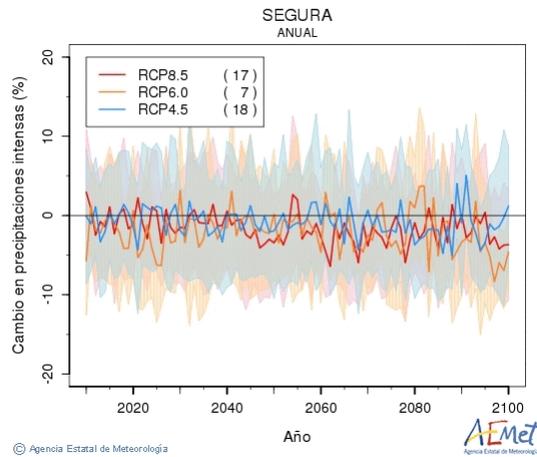
#### REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN



#### REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX

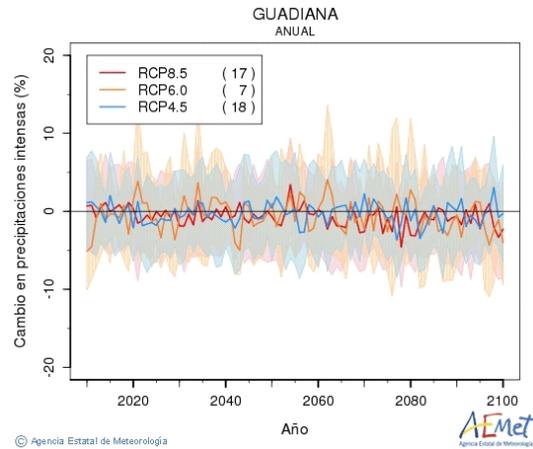


Segura: Caramel, Mundo, Luchena, Bogarra Guadalentín, Taibilla, Zumeta, Quipar, Tus, Letur, honda, Mullidar, Ortigosa, Argos, Mula, Pliego, Corneros, Turrilla, Alhárabe, Moratella, del Judío, del Moro, Salada., Albuñón, Chirivel, Algarrobo, Ortigosa, Collados, Morote, Elche, Tobarra, Chopillo, Herrerías.

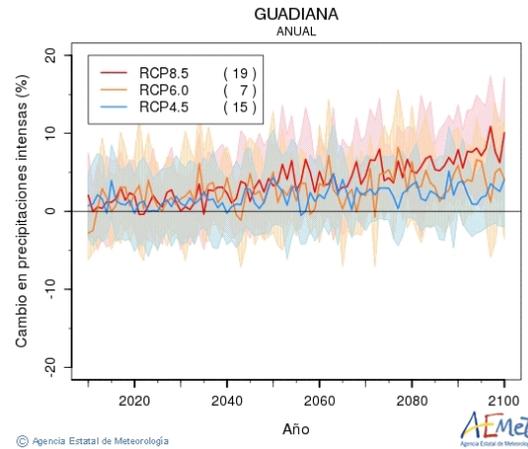


REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

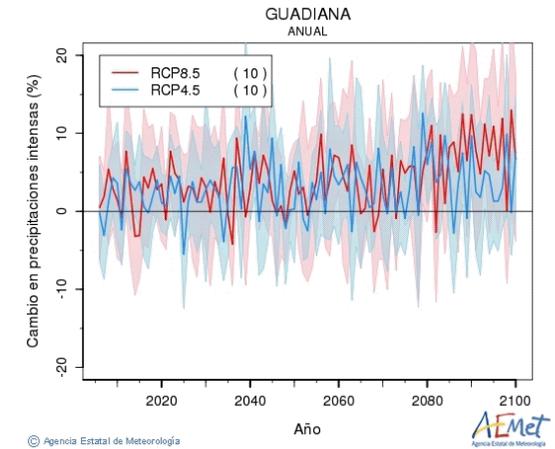
**Guadiana:** Guadlamez, Bullaque, Estena, Zújar, Zapatón, Gevorra, Alcudia, Jabalon, Azuer, Pinilla, Corcoles, Murtigas, Ardila, Rus, Gigüela, Riansares, Zancara, Amarguillo, Milagro, Fresnedoso, Estenilla, Guadarranque, Silbadillos, Guadalupejo, Cubilar, Gargaligas, Alcollarin, Rucas, Agudo, Siruela, Guadalemar, Guadarramilla, Guadamatilla, Guadalefra, Burdalo, Aljucen, ortiga, Palomillas, San Juan, Usagre, Retin, Matachel, Guadajira, Guerrero, Albarragena, zapaton, Caia, Rivillas, Calamon, Olivenza, Taliga, Godolid, Alcarrache, Sillo, Murtigas, Mortigon, Botion, Calaboz, La Viguera.



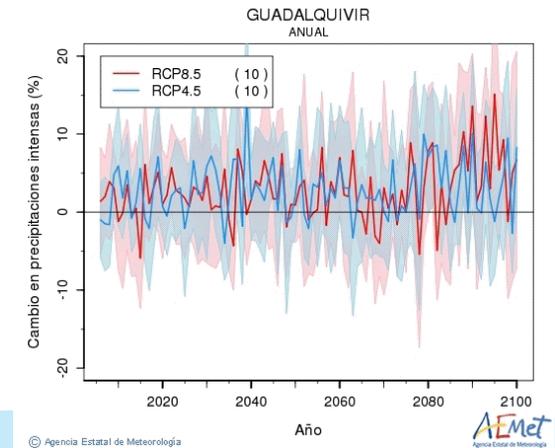
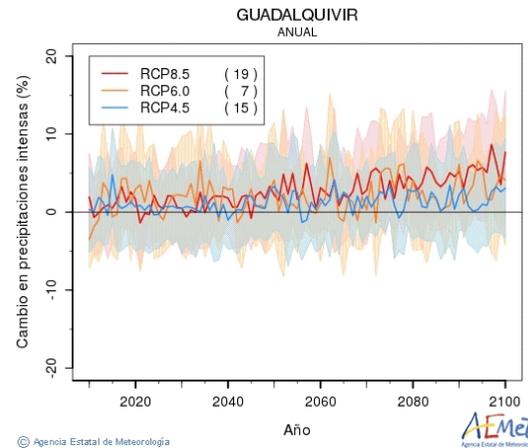
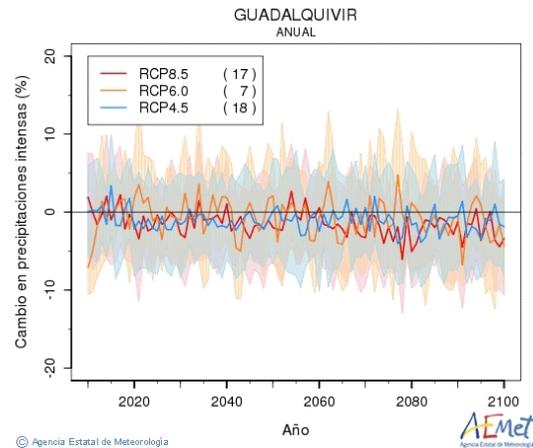
REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN



REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX



**Guadalquivir:** Aguamulas, Aguascebas, Alhama, Arenoso, Bailón, Beas, Beiro, Bembézar, Borosa, Cala, Cacán, Cambil, Cañamares, Castril, Cerezuela, Corbonés, Cuadros, Dañador, Darro, Despeñaperros, Fardes, Fresnedas, Frío, Genil, Guadahortuna, Guadalén, Guadalimar, Guadalmellato, Guadalmena, Guadatin, Guadaira, Olivanza, Taliga, Godolid, Alcarrache, Sillo, Murtigas, Mortigon, Botion, Calaboz, La Viguera.



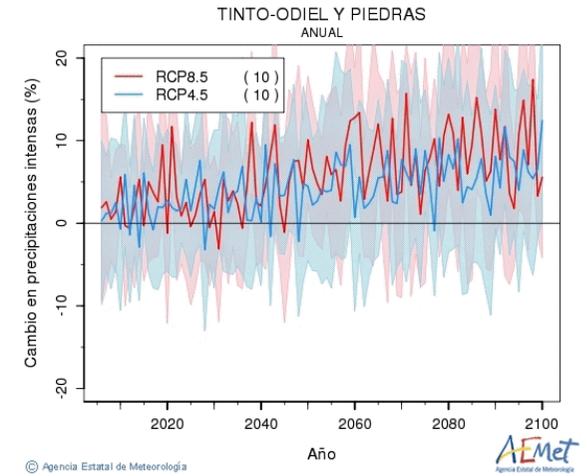
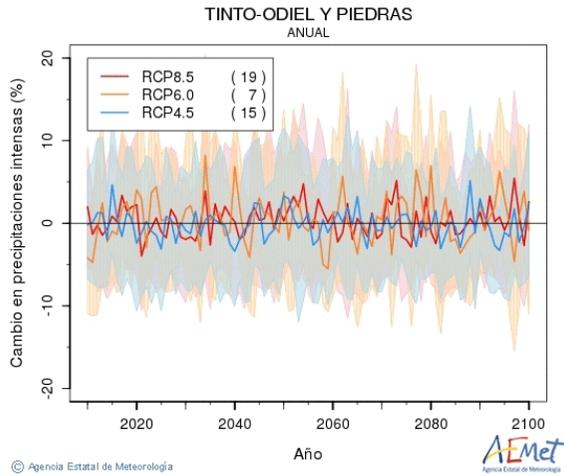
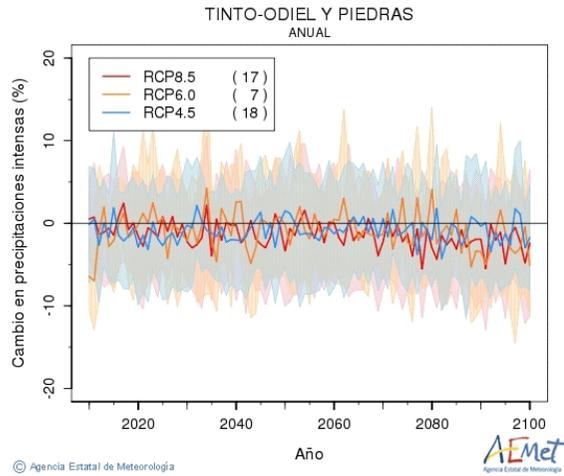
Anejo 3.- Gráficos de evolución del cambio en las precipitaciones intensas para las distintas cuencas hidrográficas (regionalización AR5-IPCC)

REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

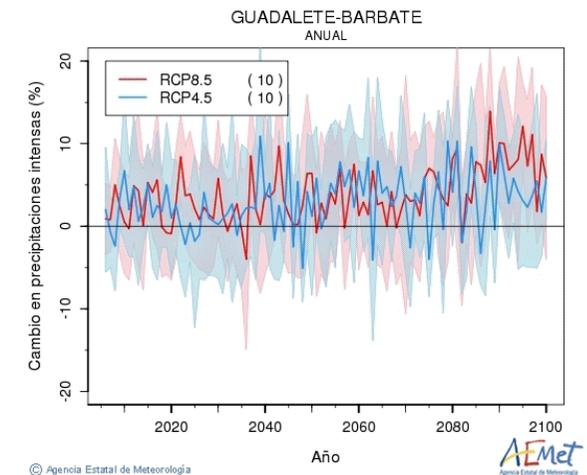
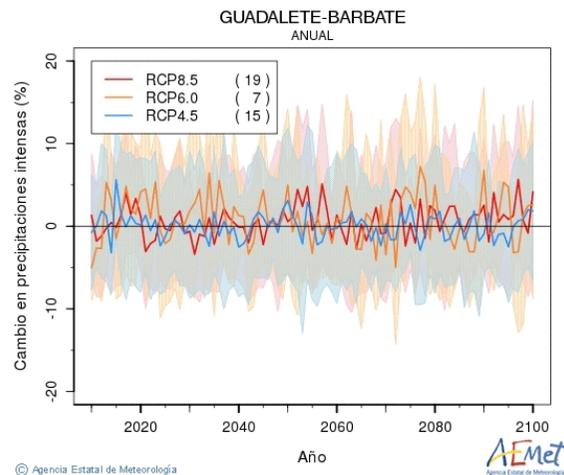
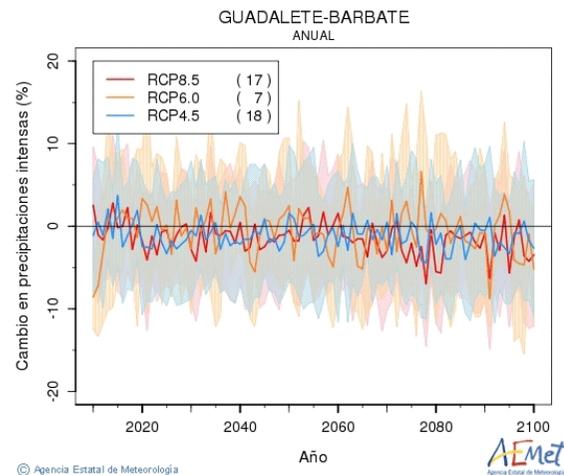
REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN

REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX

Tinto, Odiel y Piedras: Tinto, Jarama, Candón, Odiel, Oraque, Agrio, Villar, de Meca, Sta Eulalia, Olivargas, Piedras, Chanza.



Guadalete-Barbate: Guadalete, Guadalpocún, Majaceite, salado, Barbate, Celemín, Almodóvar, Álamo.

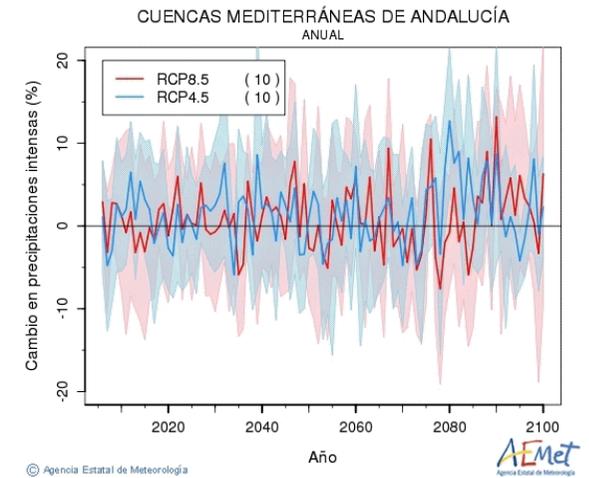
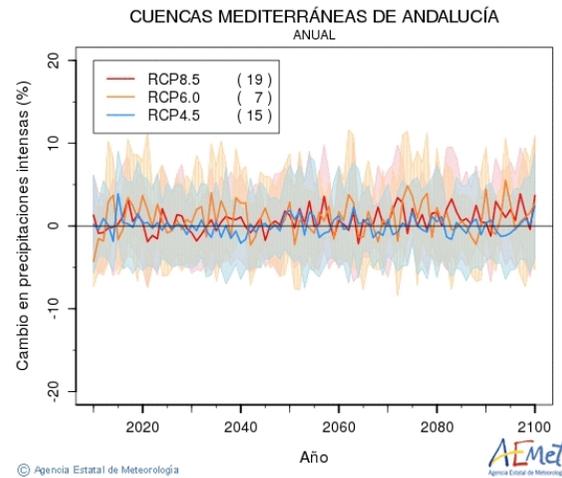
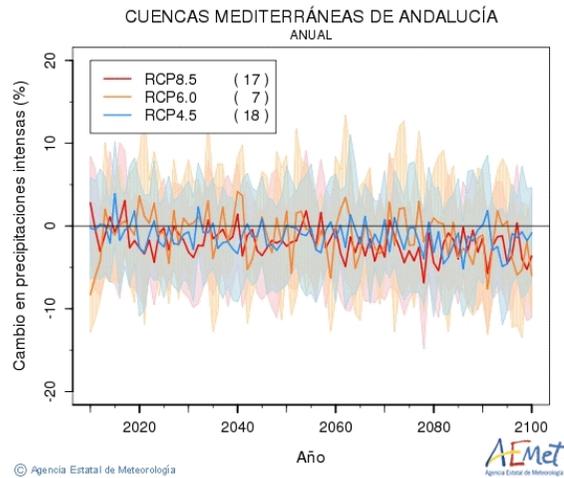


## REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: ANÁLOGOS

## REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: REGRESIÓN

## REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: CORDEX

**Mediterráneas Andaluzas:** Palmones, Charco Redondo, Guadarranque, Guadiaro, Hozgarganta, Manilva, Vaquero, Padrón, Castor, Guadalmana, Gudalmina, Guadaiza, Verde, Real, Fuengirola, Guadalhorce, Guadalmedina, Vélez, La Madre, Algarrobo, Torrox, Chillar, La Miel, Jate, Verde de Amuñécar, Guadalfeo, Adra, Andarax, Aguas, Antas, Alanzora.





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA