

Con el apoyo de:



VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



TÉCNICAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GESTIÓN FORESTAL Y LA INDUSTRIA DE LA MADERA FSC®

Modelos para la evaluación de la producción forestal ante escenarios de cambio climático y análisis de riesgos



Julio 2020



Con el apoyo de:



VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Modelos para la evaluación de la producción forestal ante escenarios de cambio climático y análisis de riesgos

Realizado a través del proyecto **Técnicas de adaptación al cambio climático en la gestión forestal y la industria de la madera FSC**, con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Este estudio está desarrollado y coordinado por Universidad de Alcalá y FSC España.

Coordinadores

Miguel Ángel de Zavala Gironés

Silvia Martínez Martínez

Autores principales

Patricia González Díaz

Miguel Ángel de Zavala Gironés

Silvia Martínez Martínez

Marcos Estevez Malvar



La marca de la gestión
forestal responsable

FSC® F000228

0. Resumen ejecutivo	3
1. La producción forestal en un contexto de cambio climático	4
2. Desarrollo de modelos para la evaluación de la producción forestal ante escenarios de cambio climático	8
2.1 Modelos para la evaluación de la producción forestal	9
2.1.1 Modelos empíricos de producción forestal	10
2.1.2 Modelos de idoneidad del hábitat	11
2.2 Escenarios de cambio climático	13
2.3 Evaluación del riesgo	16
2.4 Descripción de las localizaciones y especies de estudio	17
2.4.1 Monte San Martiño de Frades, A Coruña	17
2.4.2 Monte Vilarín, San Martín de Oscos, Asturias	20
2.5 Especies de estudio	23
3. Resultados de la evaluación de la producción forestal ante escenarios de cambio climático	24
3.1 Modelos empíricos de producción forestal	24
3.2 Modelos de idoneidad de hábitat	35
3.3 Estimación del riesgo	43
4. Discusión e identificación de los riesgos asociados al cambio climático en las especies de estudio.....	44
5. Recomendaciones para la gestión.....	48
6. Referencias.....	57
7. Anexos.....	60

RESUMEN EJECUTIVO

Los bosques son importantes repositorios de biodiversidad terrestre, y proveen múltiples servicios ecosistémicos claves para el bienestar humano. En España los bosques cubren una tercera parte de la superficie del país y su uso constituye un sector económico de cierta importancia dentro de la economía nacional, contribuyendo al Producto Interior Bruto (PIB) nacional y creando empleo. Los efectos del cambio climático podrían tener consecuencias en el sector forestal, afectando a la producción de madera.

Este proyecto denominado “Técnicas de adaptación al cambio climático en la gestión forestal y la industria de la madera FSC” que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, persigue evaluar la vulnerabilidad de la producción forestal ante los distintos escenarios climáticos esperados bajo predicciones de cambio climático a lo largo del presente siglo.

Así los objetivos concretos del trabajo son: 1) cuantificar el cambio potencial en la producción de madera para las especies *Pinus pinaster* Ait. y *Pinus sylvestris* L. ante varios escenarios de cambio climático; 2) evaluar los posibles cambios en la idoneidad del hábitat para las especies consideradas; y 3) estimar el riesgo (idoneidad y producción) para estas dos especies asociado a estos cambios climáticos. Para lograr los objetivos descritos anteriormente, en primer lugar se usaron modelos de máxima verosimilitud con el fin de cuantificar el cambio en la producción potencial, y se parametrizó el valor de la producción forestal actual en función de las condiciones climáticas de temperatura y precipitación, así como datos estructurales y de riqueza de especies en el rodal a partir de los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN). Aplicando escenarios de cambio climático procedentes de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) se proyectó el valor de la producción en condiciones de cambio climático y cuantificó el cambio. En segundo lugar, se usaron modelos de idoneidad de hábitat para evaluar la exposición de la producción forestal en un determinado hábitat y los posibles cambios ante escenarios de cambio climático. Para ello se utilizaron de nuevo datos procedentes del IFN para parametrizar el modelo en condiciones climáticas actuales y se proyectó en varios escenarios de cambio climático. En tercer lugar se estimó el riesgo asociado a la producción forestal y hábitat para cada especie y cada uno de los escenarios climáticos, teniendo en cuenta el resultado de los objetivos previos.

Los resultados se validaron con los datos locales de estos montes en cuanto a factores ambientales (clima y suelo) y producciones, incluyendo aspectos selvícolas como marco de plantación, ecotipos y tratamientos selvícolas.

En general los resultados de los modelos empíricos de producción forestal indicaron que la producción forestal del pino marítimo podría verse afectada negativamente en Galicia y en concreto en el monte de Frades bajo condiciones de cambio climático. Los efectos del incremento de la temperatura y reducción de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI podrían contribuir a reducir la producción forestal entre un 1,61 y un 8,07% en Galicia y hasta un 23,69% en Frades, en comparación con los valores de producción actuales.

En el caso del pino silvestre la producción forestal podría verse afectada de forma negativa en Asturias y en concreto en el monte Vilarín en aquellos escenarios de emisiones más pesimistas (rcp85). Concretamente para estos escenarios de emisiones más agresivos, los efectos del incremento de la temperatura y reducción de la precipitación a lo largo del siglo XXI podrían contribuir a reducir la producción forestal en Asturias entre un 18,50 y el 24,9%. Específicamente para el monte Vilarín el descenso de la producción forestal para el pino silvestre podría alcanzar el 40,7%.

Los resultados de los modelos de idoneidad de hábitat indicaron que la idoneidad del hábitat para el pino marítimo podría verse afectado tanto negativa, como positivamente en toda la península Ibérica y en concreto en la región noroccidental bajo condiciones de cambio climático, siendo las ganancias de hábitat superiores a las pérdidas. Las proyecciones para el año 2050, y según los escenarios de emisiones rcp45 y rcp85 mostraron que aunque el hábitat de la especie podría reducirse hasta un 16%, el cambio neto sería positivo con ganancias de más del 26% de hábitat a nivel peninsular y que podría llegar hasta el 40%. Los cambios obtenidos para la región noroccidental fueron un reflejo de los cambios a nivel peninsular donde el cambio neto osciló entre el 24 y 27% de hábitat nuevo. Las proyecciones para el año 2070, mostraron unos resultados muy similares a los del año 2050, con un cambio neto positivo en ambos escenarios, que para la región noroccidental alcanzaron valores entre el 27 y el 33% de ganancia neta de hábitat.

Cuando evaluamos la idoneidad del hábitat del pino silvestre encontramos que éste podría verse afectado muy negativamente en toda la península Ibérica y en concreto en la región

noroccidental bajo condiciones de cambio climático. Las proyecciones para el año 2050, y según el escenario de emisiones rcp45 mostraron que el porcentaje de pérdida de hábitat para la especie podría ser del 58%, el cual podría incrementarse hasta el 76% bajo el escenario de emisiones rcp85. En la región noroccidental las pérdidas podrían ser ligeramente inferiores a las encontradas a nivel peninsular y oscilar entre el 46 y 59% para los escenarios menos y más agresivos respectivamente. Las proyecciones para el año 2070 fueron incluso más pesimistas, que basadas en el escenario de emisiones rcp45 alcanzaron un porcentaje de pérdida de hábitat para la especie del 71% a nivel peninsular, llegando hasta el 82,31% en el escenario de emisiones más agresivo rcp85. Para la región noroccidental las pérdidas de hábitat fueron de nuevo ligeramente inferiores a los valores peninsulares, oscilando entre el 58 y el 77%.

El análisis de riesgo combinó los resultados asociados a los cambios en la producción forestal e idoneidad del hábitat y obtuvo como principal resultado un riesgo leve para el pino marítimo incrementándose hasta moderado para el pino silvestre.

Ante los resultados obtenidos en los análisis anteriores, que combinaron (i) modelos empíricos de producción forestal, (ii) modelos de idoneidad de hábitat y (iii) análisis de riesgos, se elaboraron algunas recomendaciones para la gestión en cada una de las dos localizaciones piloto dirigidas a minimizar los riesgos de los posibles impactos del cambio climático y promover la adaptación y la resiliencia de las masas.

Las medidas de adaptación al cambio climático pueden implementarse a diferentes niveles: a nivel de especie, de rodal o de paisaje. Así, en el monte de Frades, las recomendaciones a nivel de especie estarían dirigidas a favorecer la diversidad genética de la masa manteniendo la variabilidad tanto a nivel de morfotipo como de genotipo. A escala de rodal acciones encaminadas a favorecer la diversidad estructural de la masa estableciendo variantes en los tratamientos, como por ejemplo cortas a hecho en dos tiempos, incorporación de especies de diferente porte para favorecer el bosque mixto, conservar y diversificar el estrato arbustivo, así como favorecer la multifuncionalidad. A escala de paisaje unidades de gestión más amplias permiten según la ordenación diversificar la inversión e incrementar la resiliencia frente a los diferentes riesgos de la región y que se incrementarán con el cambio climático, incluyendo incendios, sequías, plagas forestales y daños por tormentas. La diversificación en unidades de gestión como tramos con una mayor diversidad estructural (inter- e intra rodal)

con masas heterogéneas se ha demostrado que es la mejor medida para favorecer la multifuncionalidad y la resiliencia en un escenario de riesgos crecientes.

Por otro lado en el monte Vilarín las medidas de adaptación serían: (i) a nivel de especie si se quiere mantener la misma puede ser necesaria la utilización de ecotipos mejor adaptados a las nuevas condiciones climáticas (migración asistida) pudiendo estas medidas impedir el cambio de especie aunque es posible que unas medidas estructurales adecuadas puedan ser suficientes para mantener como es deseable los ecotipos locales; (ii) a nivel de rodal la reducción de la densidad es la medida más habitual para amortiguar los impactos de la sequía. La diversidad estructural permite incrementar la resistencia y la resiliencia frente al incremento de la aridez. En métodos de regeneración natural el aclareo sucesivo uniforme, unas densidades más bajas y una extensión del turno de regeneración y de corta permiten mantener la regeneración en muchos sistemas pero la utilidad del método depende del tipo de producto final. La regeneración artificial permite hacer rotaciones con el ganado y disminuir el combustible vertical disminuyendo el riesgo de propagación de incendios. El mantenimiento de turnos cortos y rodales de alta densidad es sólo aconsejable si a nivel de paisaje se mantiene la diversificación estructural y funcional para incrementar la resiliencia frente a posibles riesgos como incendios, plagas, sequías y caídas por el viento. Esto requiere unidades de gestión mayores que permitan no ya solo tramos en distintas fases del turno sino heterogeneidad funcional con más de una especie (p.e. al menos una conífera y una frondosa).

Finalmente, en ambos sistemas es importante continuar con un sistema de gobernanza que implique a todos los actores locales como ganaderos, cazadores, madereros, valor recreativo local y atractivo para visitantes externos. Aunque debido al cambio climático los incendios forestales es previsible que se hagan más intensos y de mayor tamaño (mega incendios) los factores sociales seguirán siendo un factor determinante.

1 | La producción forestal en un contexto de cambio climático

Los bosques son uno de los mayores repositorios de biodiversidad terrestre, y proveen múltiples servicios ecosistémicos claves para el bienestar humano. En España, la superficie forestal ocupa el 55% del territorio nacional, siendo bosque el 36% del total nacional, lo que supone más de la tercera parte de la superficie del país (AEF 2017). Esta superficie forestal arbolada en España aumentó en más de 37.000 Ha en la década 2007-17, ocupando en este último año una superficie de 18,46 millones de Ha y con un volumen total de madera de 1.072 millones de m³ (AEF 2017).

El sector forestal en España constituye un sector económico de cierta importancia dentro de la economía nacional. La contribución del sector forestal al Producto Interior Bruto (PIB) ha ido en descenso en las últimas décadas, pasando de ser el 1,4% al 0,7% del PIB desde el año 1990 hasta 2011 (FAO, 2011). No obstante, la economía y el empleo generados por el sector forestal son vitales para el desarrollo de muchas zonas rurales en España. En concreto, el sector forestal creó un total de 162.000 empleos en el año 2011 (FAO, 2011). En concreto para Galicia, la contribución del sector forestal y de la madera al PIB es superior que a nivel nacional, alcanzando valores cercanos al 2%, y creando de forma directa e indirecta cerca de 70.000 empleos anuales (Ence, 2015). A nivel nacional el volumen de cortas anuales fue de 17,7 millones de m³ de madera en 2017, siendo más de la mitad de las cortas de especies de coníferas, y destinándose mayoritariamente (54%) a la elaboración de pasta y tableros, mientras que un menor volumen (29%) se utilizó para aserrado, madera contrachapada y chapa (AEF, 2017).

Los efectos del cambio climático son cada vez más visibles en los sistemas forestales. En las últimas décadas se han registrado cambios en la composición, estructura y funcionamiento de los sistemas forestales, que podrían estar directa o indirectamente relacionados con los cambios asociados al clima (Allen & Breshears 1998, Anderegg et al. 2013, Ruiz-Benito et al. 2017). Estos cambios registrados en el clima y constituidos principalmente por un incremento de la temperatura y las condiciones de aridez o el aumento de los fenómenos

extremos (p.ej. lluvias torrenciales) (IPCC, 2014) podrían por lo tanto desencadenar cambios en la producción de madera y tener consecuencias económicas en el sector forestal.

Ante este contexto de cambio, surge este proyecto denominado “Técnicas de adaptación al cambio climático en la gestión forestal y la industria de la madera FSC” que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. En concreto, el proyecto evalúa la vulnerabilidad de la producción de madera ante condiciones de cambio climático de dos especies ampliamente utilizadas en el sector forestal español. En concreto, los objetivos de este primer trabajo persiguen, 1) cuantificar el cambio potencial en la producción de madera en diferentes escenarios de cambio climático; 2) evaluar cambios potenciales en la idoneidad del hábitat para las especies consideradas; y 3) estimar el riesgo.

2 | Desarrollo de modelos para la evaluación de la producción forestal ante escenarios de cambio climático

2.1 MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL

La evaluación de la vulnerabilidad de la producción forestal ante escenarios de cambio climático hace referencia a una vulnerabilidad de tipo climático. La vulnerabilidad climática es el grado de susceptibilidad de un ecosistema ante los efectos adversos del cambio climático, tanto cambios en la variabilidad climática media como en los extremos climáticos (Dawson et al. 2011, IPCC 2014). La vulnerabilidad climática puede influir de forma considerable en procesos demográficos como la mortalidad (Carnicer et al. 2011; Ruiz-Benito et al. 2013a, Camarero et al. 2015) o la regeneración (p. ej. Matías et al. 2011), así como en la productividad y diversas funciones ecosistémicas como el almacenamiento y la fijación de carbono, entre otros.

Para evaluar la vulnerabilidad potencial de la producción forestal asociada a los diferentes escenarios de cambio climáticos se tienen en cuenta varias componentes que integran la

producción forestal potencial máxima. Así, por un lado se considera la capacidad de la especie para la producción de madera en un determinado lugar (estimado mediante modelos empíricos); mientras que por otro lado se considera la exposición de la especie ante escenarios de cambio climático (estimado mediante los modelos de idoneidad de hábitat). La combinación de esta información nos permitirá predecir impactos potenciales en la producción forestal asociados a los cambios en el clima.

2.1.1 MODELOS EMPIRICOS DE PRODUCCION FORESTAL

Para la evaluación de la producción potencial máxima de la especie usamos un modelo empírico de producción calibrado mediante técnicas de máxima verosimilitud, donde predecimos el valor de la producción forestal en función de las condiciones climáticas que tienen un mayor efecto sobre la misma. Para evaluar la producción potencial máxima se consideraron además aquellas variables potencialmente influyentes en la producción forestal, incluyendo el clima (p. ej. temperatura y precipitación), la estructura del bosque (p. ej. densidad arbórea y tamaño medio de los individuos) y la diversidad (p. ej. riqueza de especies arbóreas).

Cálculo de la producción forestal actual

Para parametrizar el modelo de producción se utilizaron datos armonizados a nivel de individuo de diámetro a la altura del pecho (d.a.p.) del Segundo y Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN2 e IFN3) a nivel peninsular. Con ellos se calculó el área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), la biomasa (Mg ha^{-1}) y el volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) de cada individuo arbóreo y de cada parcela. Para el cálculo del volumen se tuvieron en cuenta únicamente los pies mayores, que son aquellos individuos con un d.a.p. superior a 75 mm y altura mayor a 1.30 m. La biomasa se calculó a partir del d.a.p. siguiendo las ecuaciones de Montero et al. (2005) como se indica en la ecuación (1).

$$\text{Biomasa (Mg Ha}^{-1}\text{)} = CF \times a \times d.a.p.^b \quad (1)$$

Donde CF , a y b son parámetros únicos para cada especie y fracción, $d.a.p.$ es el diámetro a la altura de pecho del individuo (mm). El volumen se calculó aplicando una densidad de $0,449 \text{ ton/m}^3$ para el pino silvestre y de $0,479 \text{ ton/m}^3$ para el pino marítimo.

La producción forestal en términos de volumen se calculó como el cambio anual de volumen entre el IFN2-IFN3 para cada uno de los individuos respecto al número de años entre inventarios, según se describe en la ecuación (2).

$$\text{Producción forestal (m}^3\text{Ha}^{-1}\text{año}^{-1}) = \frac{V_3 - V_2}{t} \quad (2)$$

Donde V_3 y V_2 es el volumen de madera producido en el IFN2 e IFN3 respectivamente; y t es el número de años entre ambos inventarios para cada parcela.

Predicción de la producción forestal máxima

Este modelo permite predecir la producción forestal potencial en términos de volumen ($\text{m}^3 \text{ha año}^{-1}$) en función de aspectos estructurales, climáticos y de diversidad e integra el volumen de madera como variable respuesta (ecuación 3).

$$\text{Volumen de madera} = [max \times \mu \times \delta \times \beta] \quad (3)$$

Donde *max* es un parámetro del modelo que representa el valor máximo de volumen de madera cuando el resto de condiciones son óptimas y el resto contienen una serie de escalares que varían entre 0 y 1 y que cuantifican como el máximo potencial se puede ver reducido en función de las condiciones estructurales, climáticas o de diversidad (es decir μ , δ o β , respectivamente, ver detalles metodológicos en Ruiz-Benito et al. 2014, 2017, González-Díaz et al. 2019). Los datos climáticos utilizados comprenden datos de precipitación y temperatura procedentes de la AEMET, los datos estructurales son referentes a la densidad arbórea y tamaño medio de los individuos, mientras que los datos de diversidad son datos de riqueza de la parcela.

Los modelos empíricos de producción forestal calibrados mediante técnicas de máxima verosimilitud de este trabajo no incorporan la variable suelo específicamente. No obstante, la producción forestal está ligada directamente a la evapotranspiración, que a su vez depende de la profundidad del suelo y de su capacidad de almacenamiento de agua (p. ej. textura y estructura). Así, este planteamiento contempla de forma indirecta los aspectos edafológicos, lo que minimiza el error asociado a esta variable.

Predicción de la producción ante escenarios de cambio climático

Una vez parametrizada la función para el cálculo de la producción forestal, proyectamos el modelo sobre las nuevas condiciones climáticas de precipitación y temperatura según los escenarios de emisiones rcp4.5 y rcp8.5 para los años 2050 y 2070.

2.1.2 MODELOS DE IDONEIDAD DEL HÁBITAT

Para la evaluación de la exposición de la producción forestal ante escenarios de cambio climático se utilizan modelos de idoneidad de hábitat, donde se predice la idoneidad del hábitat en condiciones climáticas de temperatura y precipitación esperadas bajo escenarios de cambio climático. Estos modelos permiten hacer una aproximación espacialmente explícita de la adecuación del hábitat para una especie bajo unas condiciones climáticas concretas.

Para parametrizar el modelo se utilizaron datos de presencia de la especie de estudio a partir de los datos armonizados a nivel de individuo del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) a nivel peninsular para aquellos análisis de toda la España peninsular o a nivel de la zona de estudio (Figura 1) para los análisis centrados en la región noroccidental.

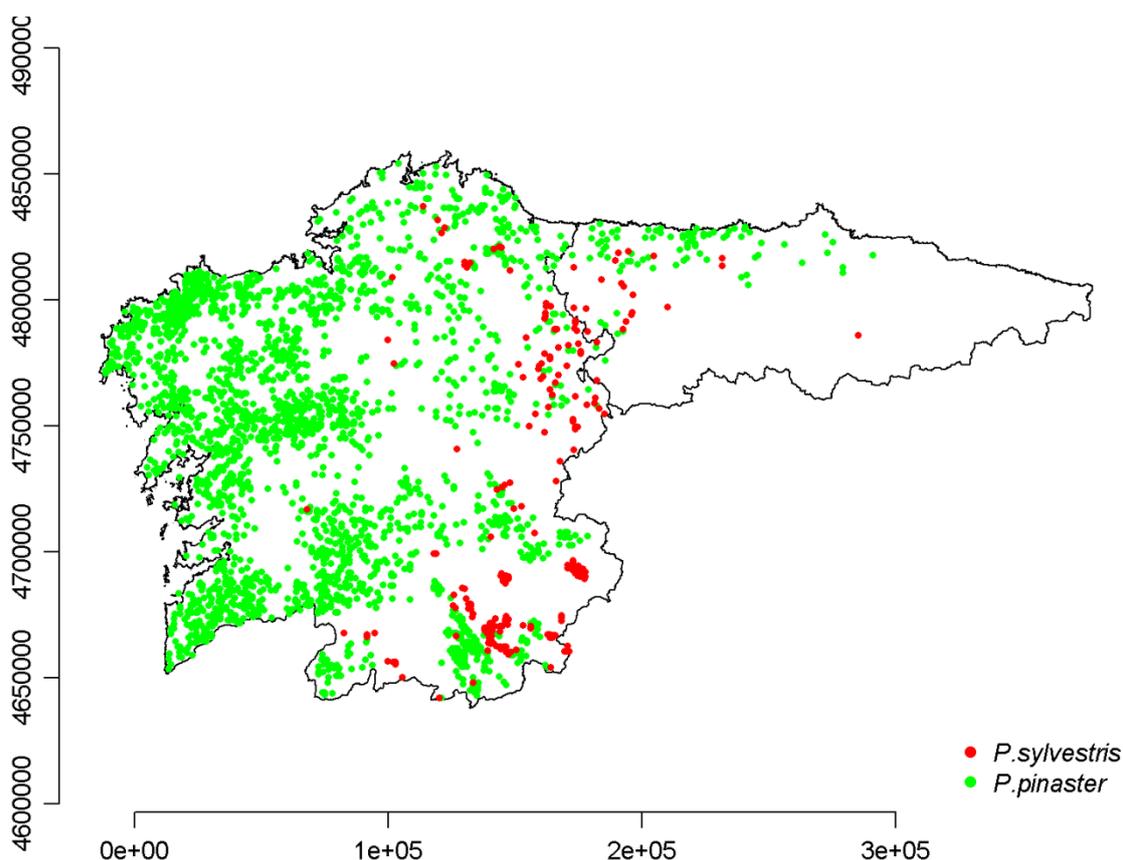


Figura 1. Datos de presencia de las especies *Pinus pinaster* (verde) y *Pinus sylvestris* (rojo) procedentes del Inventario Forestal Nacional (IFN3) en la comunidades autónomas de Galicia y Asturias.

Asimismo se utilizaron datos climáticos presentes y futuros procedentes de la base de datos worldclim, a una resolución de 5 km². Para seleccionar aquellas variables climáticas que van a ser más determinantes en la distribución de cada una de las especies de estudio, realizamos un análisis exploratorio donde comparamos el espacio ambiental ocupado por las variables climáticas de estudio y ocupado por la especie en concreto (Figura S1a y S2a en Anexos). Además realizamos un análisis de componentes principales (PCA) en el que observamos cómo de correlacionadas están todas las variables climáticas utilizadas (Figura S1b y S2b en Anexos). Finalmente se consideran aquellos aspectos biológicos que limitan el crecimiento y la regeneración para cada una de las especies.

Finalmente, las variables climáticas seleccionadas con las que se desarrollan los modelos de idoneidad de hábitat se describen en la Tabla 1.

Tabla1. Descripción de las variables climáticas utilizadas en los modelos de distribución de especies

Variable	Descripción
BIO1	Temperatura media anual
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100)
BIO12	Precipitación total anual
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO19	Precipitación del cuarto más frío

Para realizar estos análisis se parametrizó el modelo usando cinco algoritmos estadísticos. Específicamente se usaron los modelos lineales generalizados (GLMs; McCullagh & Nelder, 1989), modelos aditivos generalizados (GAMs; Hastie & Tibshirani, 1990), random forest (RF; (Breiman 2001)), análisis de clasificación de árbol (CTA; Breiman et al., 1984) y MaxEnt (Phillips et al. 2006). Todos los modelos fueron procesados en el paquete ‘biomod2’ (Thuiller et al. 2009) en R 3.5.2 (R Core Team 2018). El desarrollo del modelo fue evaluado usando el parámetro del área bajo la curva (ROC). Se realizó la media de las predicciones de cada uno de los cinco algoritmos para crear un modelo ensamblado. Evaluamos el modelo resultante con el 20% de los datos de evaluación que fueron separados inicialmente.

2.2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para proyectar los modelos de producción forestal bajo escenarios de cambio climático, se han utilizado los escenarios climáticos pronosticados por la AEMET basados en los escenarios de emisión definidos en el quinto informe del IPCC. Estos escenarios de emisión, denominados “Trayectorias de Concentración Representativas” (RCP por sus siglas en inglés, Representative Concentration Pathway), se definen en base al Forzamiento Radiativo (FR) que es la diferencia entre la insolación absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio, total para el año 2100 y que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m².

Estos escenarios se basan en series temporales de emisiones y concentraciones del conjunto de gases de efecto invernadero y otros gases químicamente activos, así como usos del suelo y cobertura (Moss et al., 2008). Además, cada trayectoria RCP contempla los efectos de las posibles políticas o esfuerzos internacionales dirigidas a paliar el cambio climático, de manera que los esfuerzos en mitigación conducen a unos niveles de forzamiento muy bajo (RCP2.6), intermedio (RCP4.5 y 6.0) y muy alto (RCP8.5) (Figura 2). Cada RCP conduce a unas condiciones climáticas de temperatura y precipitación específicas a lo largo del siglo XXI.

En concreto para este trabajo se han utilizado dos de los escenarios RCP, en concreto el RCP4.5 y el RCP8.5 por representar los umbrales cercanos al mínimo y máximo de emisiones y por lo tanto de predicciones climáticas para el siglo XXI. A continuación, se describen cada uno de los escenarios utilizados.

RCP4.5 es un escenario de emisiones bajo-moderado, en el cual las emisiones de gases de efecto invernadero no superarían los 40 GtCO₂ –eq/yr para finales del siglo XXI (ver Figura 2), y la Fuerza Radiativa sería estabilizada a aproximadamente 4,5 W m⁻² y 6,0 W m⁻² a partir de 2100.

RCP8.5 es un escenario de emisiones elevado, en el cual las emisiones de gases de efecto invernadero podrían aproximarse a los 140 GtCO₂ –eq/yr para finales del siglo XXI (ver Figura 2) y la Fuerza Radiativa llegaría a alcanzar los 8,5 W m⁻² para 2100 y continúa aumentando durante algún tiempo.

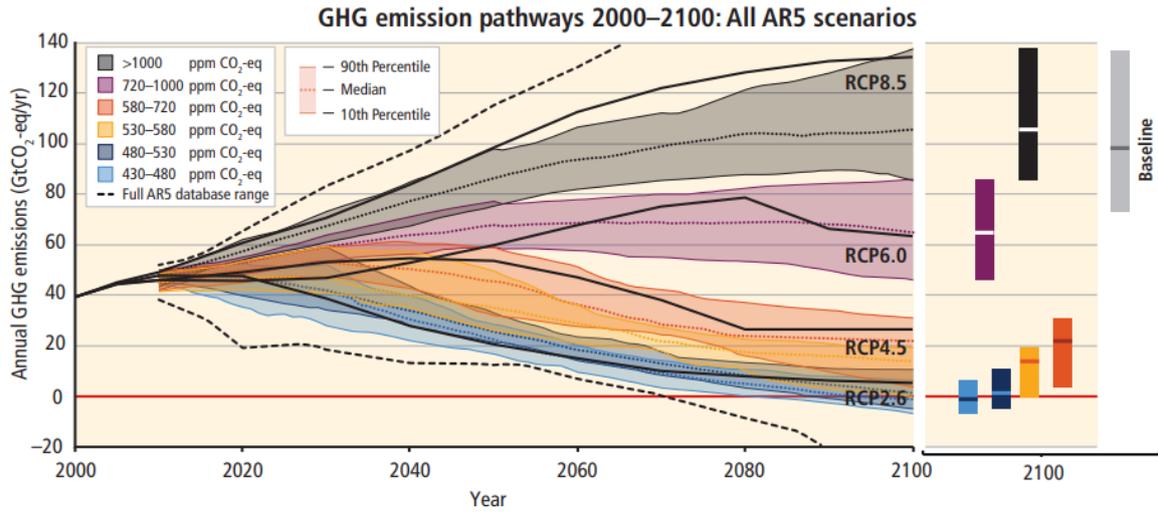


Figura 2. Emisiones de gases de efecto invernadero (GtCO₂-eq/yr hace referencia a gigatonnes de CO₂ al año) a lo largo del siglo XXI para diferentes escenarios de mitigación y niveles de concentración de los gases. Figura procedente del informe IPCC, 2014

2.3 CÁLCULO DEL RIESGO ASOCIADO A LA PRODUCCIÓN FORESTAL Y CAMBIOS DE HÁBITAT

Para el cálculo del riesgo trabajamos a escala de comunidad autónoma. Para ello utilizamos el modelo de cálculo del riesgo desarrollado por Van Oijen & Zavala (2019), descomponiendo el riesgo como el producto de dos factores: la probabilidad de que ocurra un peligro y la vulnerabilidad del ecosistema (ecuación 4).

$$R = V_1 * V_2 \quad (4)$$

Donde V_1 es el cambio en la producción media, expresado como la diferencia entre la producción para las condiciones actuales y la producción para las condiciones bajo escenarios de cambio climático, y V_2 es la probabilidad de que sucedan condiciones que suponen un riesgo para la idoneidad de la especie en un determinado lugar. Para ello hacemos una aproximación con los resultados de los modelos de idoneidad, entendiendo que el porcentaje de pérdida de hábitat es un indicador de la proporción de lugares en los que las condiciones climáticas serán un riesgo para la presencia de la especie. R será calculado para cada uno de los escenarios climáticos y será ponderado por dos parámetros α y β que dependiendo de su valor permitirán establecer unos escenarios de producción orientados a la conservación o en los que prime únicamente la producción (ecuación 5). En el caso de la vulnerabilidad 2, solo tendremos en cuenta los cambios negativos en la idoneidad del hábitat, ya que los positivos no producen ningún riesgo.

$$R = \alpha V_1 * \beta V_2 \quad (5)$$

2.4 DESCRIPCIÓN DE LAS LOCALIZACIONES Y ESPECIES DE ESTUDIO

2.4.1 MONTE SAN MARTIÑO DE FRADES, A CORUÑA

El **Monte San Martiño de Frades**, situado en la provincia de A Coruña, es propiedad y está bajo la gestión de la empresa Financiera Maderera, S.A. (Finsa) desde la década de los sesenta. El monte cuenta con varias fincas que suman un total de 107,17 hectáreas de superficie (cantones 46 a 64 incluidos). Su vegetación principal es el pino marítimo (*Pinus pinaster*), con presencia cada vez más abundante de pino de Monterrey (*Pinus radiata*).



Foto 1: Monte San Martiño de Frades (A Coruña)

El monte se encuentra situado a una altitud que oscila entre los 350 y los 450 m s.n.m., siendo la pendiente media del 20%, con un sustrato donde predominan las rocas básicas y los suelos evolucionados y profundos. Las características climáticas del monte corresponden a un clima atlántico templado, con una temperatura media anual de 13,1°C y unas precipitaciones anuales en torno a los 1400 mm.

La tendencia climática de las últimas dos décadas en el Monte de San Martiño de Frades indica que la temperatura media anual ha sufrido un ligero aumento en los últimos años (Figura 3). Por otro lado, la sequía, medida mediante el índice de SPEI muestra valores de SPEI (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index) que oscilan aproximadamente entre 2 y -3 (Figura 4a), con una tendencia hacia valores más negativos (Figura 4b), lo que se traduce en un incremento de las sequías en las últimas décadas.

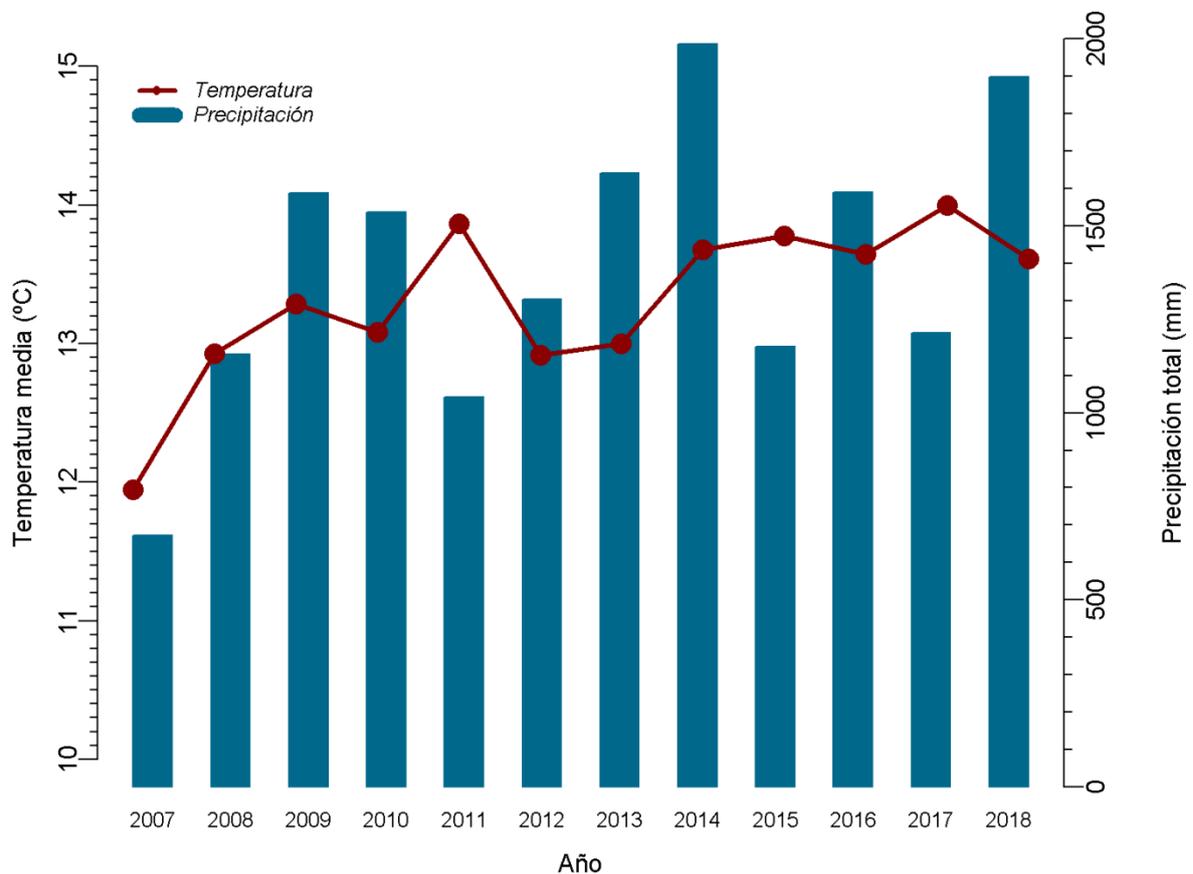


Figura 3. Evolución de la temperatura media y de la precipitación total anual desde el año 2007 hasta el 2018 para la estación meteorológica de Santiago (A Coruña).

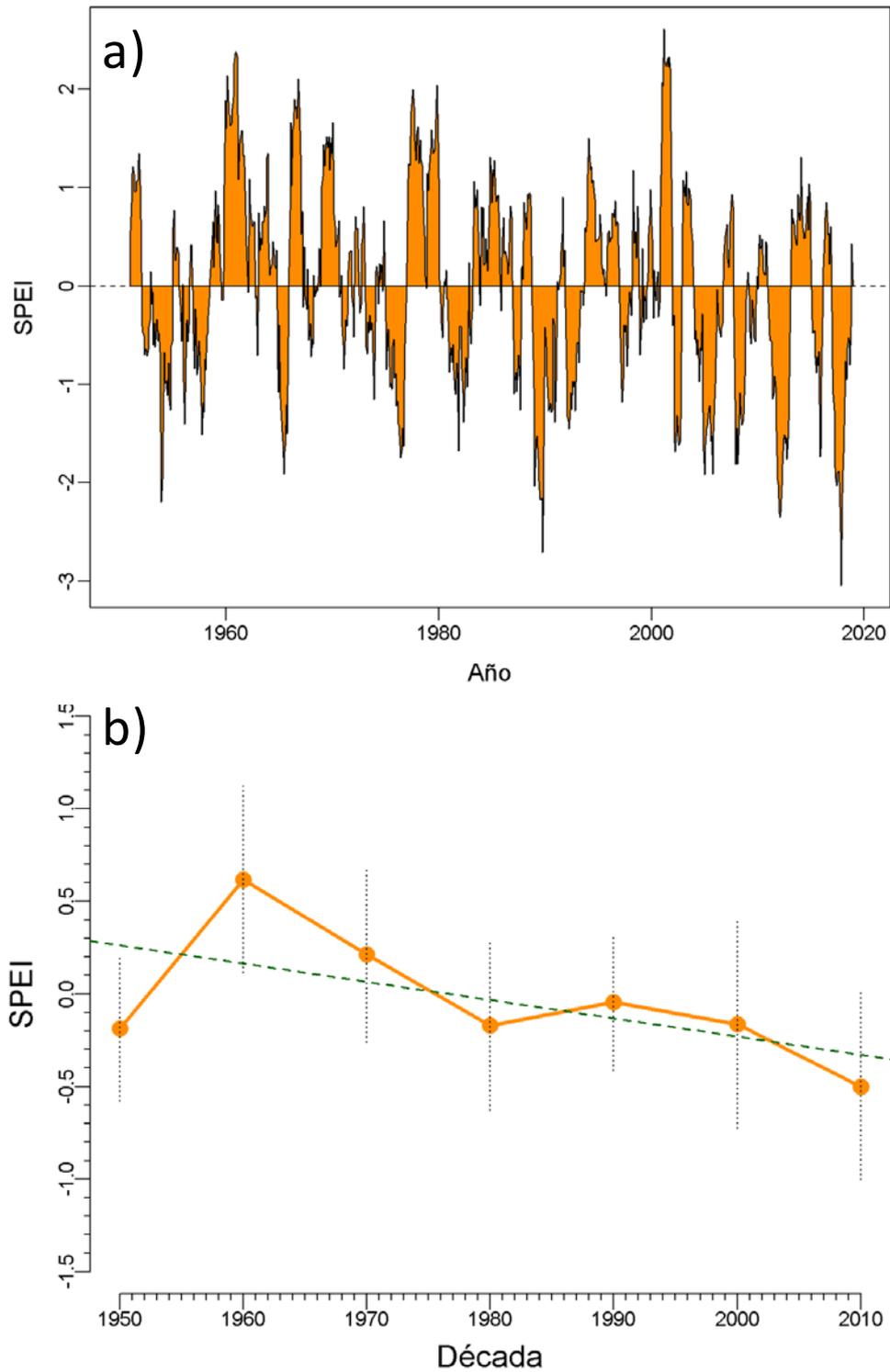


Figura 4. Índice de sequía SPEI (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index) a) mensual para el monte de Frades desde 1950 hasta el año 2019, b) agregado por décadas para el monte de Frades desde 1950 hasta el año 2010. Las líneas punteadas verticales indican la desviación estándar. La línea discontinua verde indica la línea de tendencia. Los valores negativos del índice de sequía SPEI indican condiciones de mayor aridez.

2.4.2 MONTE VILARÍN, SAN MARTÍN DE OSCOS, ASTURIAS

El **Monte Vilarín**, situado en el término municipal de San Martín de Oscos, Asturias, es propiedad privada de la Sociedad Mercantil ROUPAR DE GESTIÓN S.L. y desde 2011 está incluido en uno de los Grupos de Gestión Forestal de CERNA Ingeniería y Asesoría Medioambiental S.L., amparado en los certificados de gestión forestal sostenible FSC y PEFC. El monte cuenta con 138 hectáreas de superficie privada y no forma parte de ningún espacio natural protegido. Su vegetación principal es el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), con presencia más o menos abundante de *Pinus radiata*, así como *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus pyrenaica*.



Foto 2: Monte Vilarín (San Martín de Oscos, Asturias)

El monte se encuentra situado a una altitud media de 810 m s.n.m., con una cota mínima de 559 m y una cota máxima de 895 m, siendo la pendiente media del 25% con un sustrato donde predominan la pizarra. Las características climáticas del monte corresponden a un clima atlántico con algunos rasgos continentales, dada su localización al sur de la sierra de la Bobia, que provoca una marcada amplitud térmica. La temperatura media anual es de 10,6°C y unas precipitaciones anuales en torno a los 1200 mm, calculado a partir de los datos de los últimos 20 años en la estación climatológica de O Xipro (Lugo).

La tendencia climática de las últimas dos décadas en el Monte de Vilarín indica que la temperatura media anual ha sufrido un ligero aumento (Figura 5). Por otro lado, la sequía, medida mediante el índice de SPEI oscilan aproximadamente entre 1 y -1 (Figura 6a), y muestra valores más negativos en los últimos años (Figura 6b).

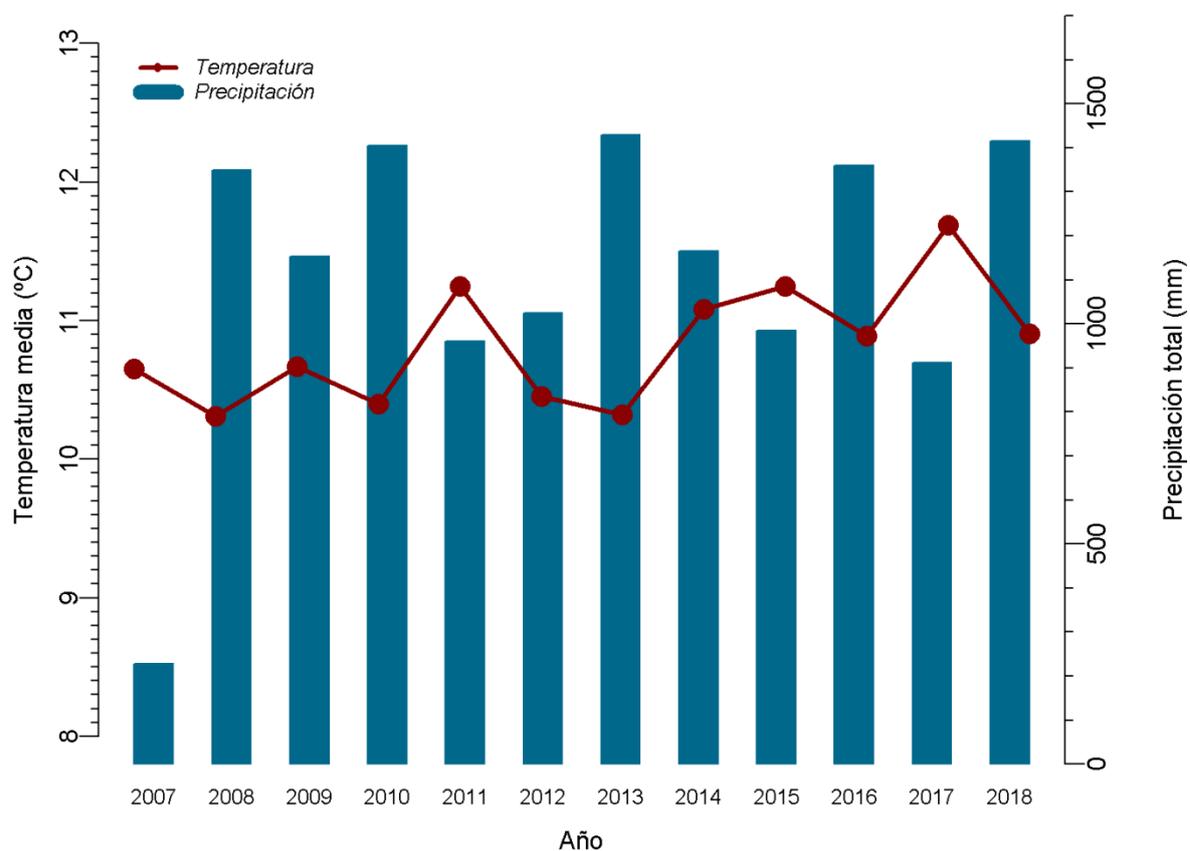


Figura 5. Evolución de la temperatura media y de la precipitación total anual desde el año 2007 hasta el 2018 para la estación meteorológica de O Xipro (A Fonsagrada, Lugo).

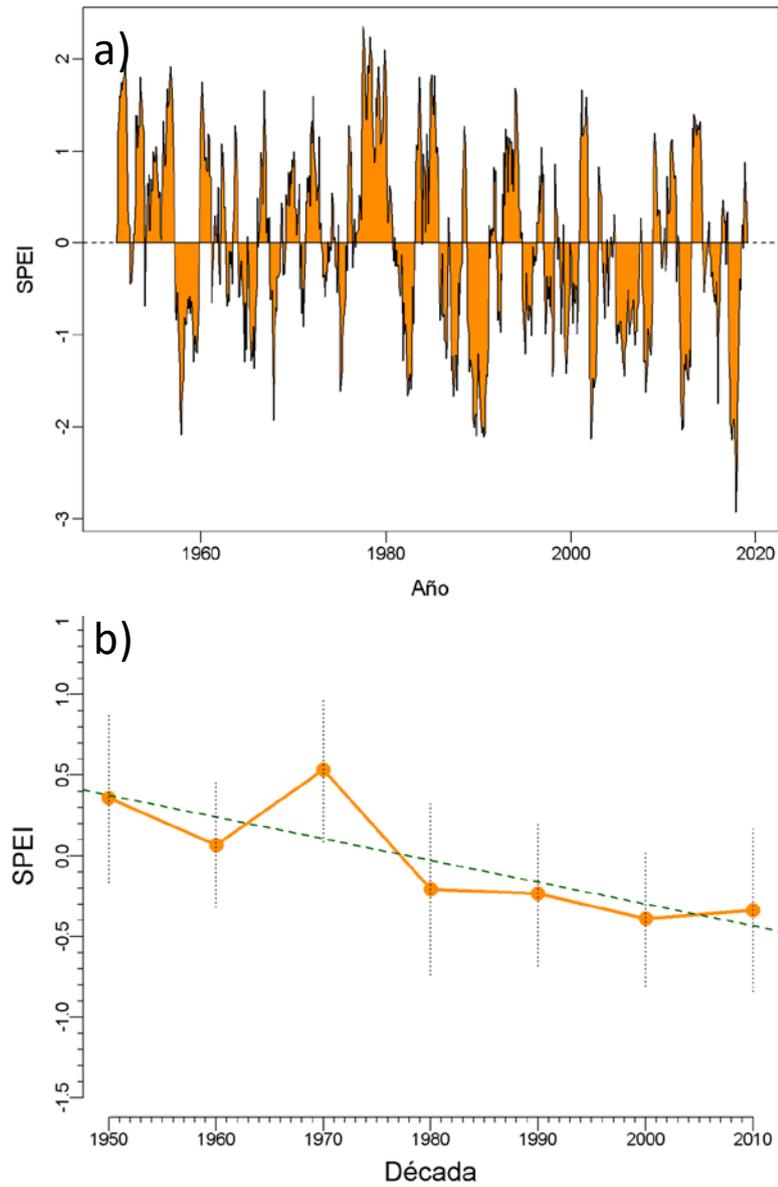


Figura 6. Índice de SPEI (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index) para el monte de Vilarín desde 1950 hasta el año 2019, a) y b) agregado por décadas para el monte de Vilarín desde 1950 hasta el año 2019. Las líneas punteadas verticales indican la desviación estándar. La línea discontinua verde indica la línea de tendencia. Los valores negativos del índice de sequía SPEI indican condiciones de mayor aridez.

2.5 ESPECIES DE ESTUDIO

Las especies de estudio en las que se centra este trabajo son el pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) y el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.).

El pino silvestre es una especie de pino con una de las distribuciones más amplias a nivel mundial. En la península ibérica aparece en zonas de montaña y su distribución en las comunidades autónomas de Galicia y Asturias se limita principalmente a zonas elevadas, con unas precipitaciones medias de 1360 mm y unas temperaturas medias de 9,37 °C.

El pino marítimo se distribuye por toda la península ibérica, desde el nivel del mar hasta zonas que superan los 1000 metros de altitud; desde lugares con menos de 350 mm de precipitación anual y más de 4 meses de sequía a otras zonas con más de 1700 mm y sin sequía estival (Galicia, España). El pino marítimo es particularmente abundante en la comunidad autónoma de Galicia (Figura 7), donde la superficie forestal arbolada representa 1,45 millones de hectáreas, siendo la superficie ordenada el 11,44% de la misma y donde esta especie representa la conífera que mayor superficie ocupa.

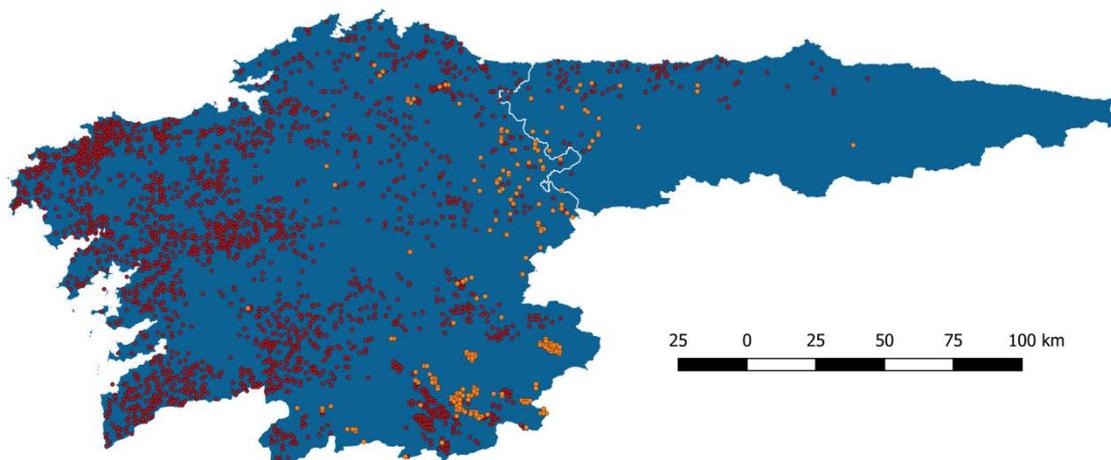


Figura 7. Datos de presencia de las especies *Pinus pinaster* (rojo) y *Pinus sylvestris* (verde) procedentes del Inventario Forestal Nacional (IFN3) en las comunidades autónomas de Galicia y Asturias.

3

Resultado de la evaluación de la producción forestal

3.1 MODELOS EMPIRICOS DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL POTENCIAL MÁXIMA

MODELO PARA PINUS PINASTER

a. PREDICCIÓN EN CONDICIONES ACTUALES

Los resultados de la parametrización de la producción forestal potencial máxima mostraron una respuesta no lineal en la producción de volumen de madera a lo largo del gradiente de temperatura y precipitación. La respuesta de la producción del pino marítimo presentó una respuesta leve a la temperatura, con una tendencia de descenso en la producción de volumen de madera hacia elevadas temperaturas (Figura 8a). La respuesta del pino marítimo con respecto a la precipitación presentó una tendencia de aumento leve hasta un umbral a partir del cual la producción se ve mermada de forma significativa (Figura 8b). Esta tendencia con forma de campana de Gauss fue similar cuando estudiamos la respuesta de la producción forestal en función de la densidad (Figura 8c) y del tamaño de los individuos (Figura 8d).

La predicción de la producción anual de **pino marítimo** en términos de volumen en el monte de Frades en función del clima (precipitación y temperatura, ver Figura 8a y 8b), la estructura del rodal (dbh y densidad), así como la diversidad en condiciones actuales, fue de **9,59 m³/ha*año**. La predicción de la producción anual para toda Galicia fue de **9,30 m³/ha*año**. Si comparamos el valor predicho con los datos de incremento anual de volumen con corteza (IAVC) (crecimiento corriente de volumen con corteza), que oscilan entre 9,99 y 20,02 m³/ha*año, con un valor medio de crecimiento corriente de 13,44 m³/ha*año, observamos que el valor predicho es ligeramente inferior. El valor de producción forestal de Frades es

bajo en comparación al máximo potencial de la especie dado que la densidad es bastante inferior a la densidad media de los bosques españoles para esta especie, 795,53 ind/ha con respecto a 1293 ind/ha respectivamente, lo cual reduce considerablemente la producción media por hectárea. La diferencia en los valores predichos en comparación con los valores calculados en el plan de gestión puede deberse también a otros factores como el uso de fertilizantes u otras intervenciones antrópicas que incrementen la producción.

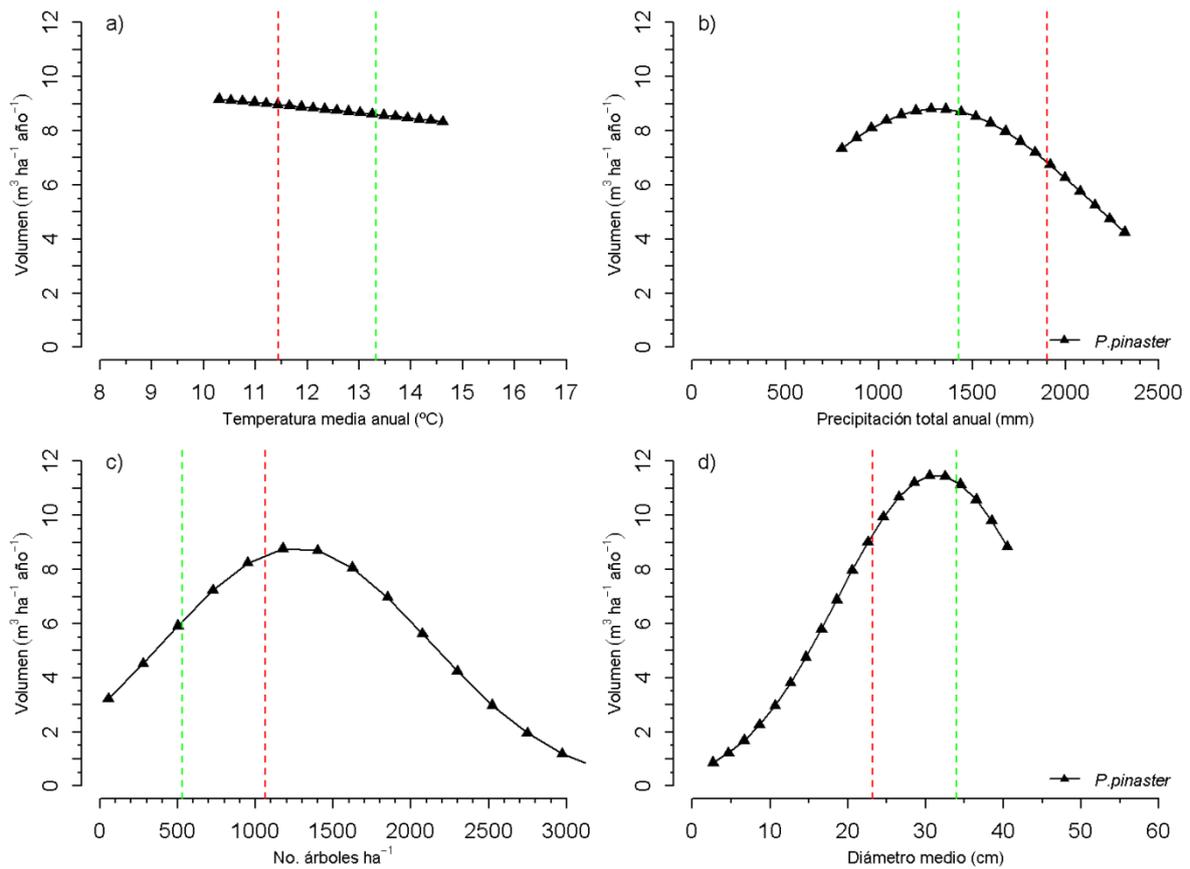


Figura 8. Predicción de la producción anual en términos de volumen ($\text{m}^3/\text{ha}\cdot\text{año}$) para *Pinus pinaster* en función de (a) la temperatura media anual, (b) la precipitación total anual, (c) la densidad del rodal, y (d) el tamaño medio de los individuos. Las líneas verdes discontinuas indican las condiciones anuales de temperatura, precipitación, densidad o diámetro medio para la localización de estudio, San Martiño de Frades. Las líneas rojas discontinuas indican las condiciones para la comunidad autónoma en las que se encuentra la localización de estudio, Galicia para el pino marítimo.

b. PREDICCIÓN EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

A continuación se describen las predicciones futuras de temperatura media y precipitación total anual de la AEMET para la localizaciones de estudio de Frades, así como para la comunidad autónoma de Galicia (Tabla 2), para los diferentes escenarios rcp45 y rcp85 para el año 2050 y 2070.

Tabla 2. Descripción de las predicciones de temperatura y precipitación basadas en diferentes escenarios AEMET para la localización de estudio de Frades y la Comunidad Autónoma de Galicia.

Escenario	Temperatura Media Anual					Precipitación Total Anual				
	Actual	2050	2050	2070	2070	Actual	2050	2050	2070	2019
		Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85		Rcp45	Rcp85	Rcp85	rc45
Monte	13,32	11,34	13,14	12,61	13,61	1427	1672,51	1556,29	1310,45	1546,67
Frades	±4,67	±6.61	±6.79			±8,57	±103,91	±334,10		
CCAA	11,45	10,85	12.71	12,26	13,14	1900 ±	1689±	1367	1192 ±	1414 ±
Galicia	±1.28	±1,32	± 1.34	± 1,23	± 1,27	305,30	304,41	±244,58	191,62	205,60

Cuando proyectamos el modelo parametrizado con las condiciones climáticas, estructurales y de riqueza actuales en escenarios futuros (condiciones climáticas futuras en el año 2050 y 2070 y escenarios AEMET de emisiones rcp 4.5 y rcp 8.5) los valores obtenidos de producción forestal en términos de volumen oscilan entre 8,55 y 9,15 m³/ha*año para el pino marítimo en la comunidad autónoma de Galicia (Tabla 3). Estos valores suponen un descenso en la producción forestal que oscila entre el 1,61 y el 8,07% en comparación con los obtenidos en condiciones actuales. Cuando proyectamos el modelo con las condiciones climáticas futuras para la localización de estudio los valores de producción forestal en términos de volumen se reducen hasta valores de que oscilan los 8,15 y 9,23 m³/ha*año para el pino marítimo (Tabla 3, Figura 9 y 10). Estos valores de producción suponen un descenso del 3,75 al 15,01% de la producción forestal para la especie.

Tabla 3. Descripción de las predicciones de producción de volumen expresado en m³/ha*año para el pino marítimo y su porcentaje de cambio (%) para cada uno de los escenarios AEMET para la localización de estudio de Frades y la Comunidad Autónoma de Galicia.

Escenario	Volumen (m ³ /ha*año)					Porcentaje de cambio (%)			
	Actual	2050	2050	2070	2070	2050	2050	2070	2070
		Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85
Monte Frades	9,59	9,19	8,15	9,85	9,23	-4,17	-15,01	+2,71	-3,75
CCAA Galicia	9,30	8,81	9,12	9,15	8,97	-5,27	-1,94	-1,61	-3,55

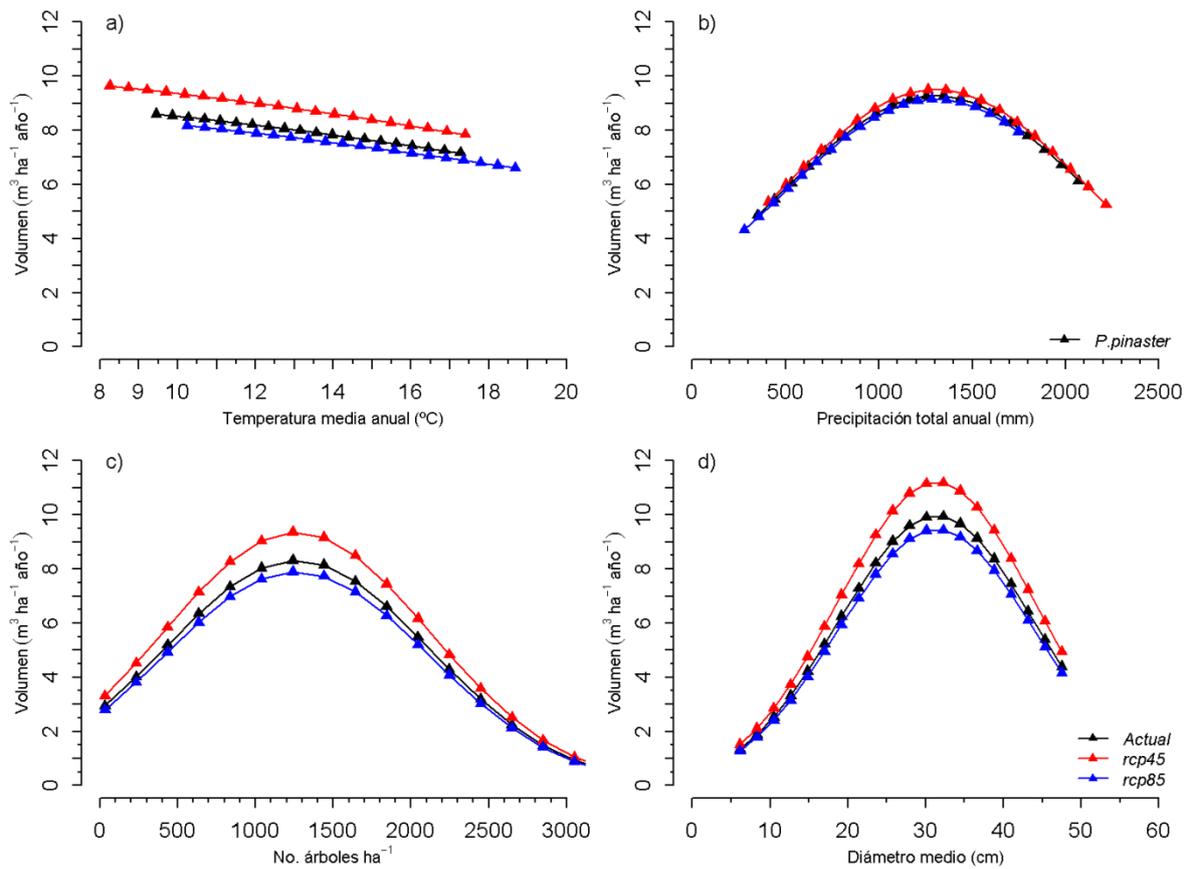


Figura 9. Predicción de la producción anual en términos de volumen (m³/ha*año) para *Pinus pinaster* en función de (a) la temperatura media, (b) precipitación total anuales, (c) densidad del rodal, y (d) tamaño medio del individuo en condiciones climáticas actuales (línea negra) y futuras (año 2050 y escenario rcp45 y rcp85; línea roja y azul respectivamente) según escenarios previstos por la AEMET.

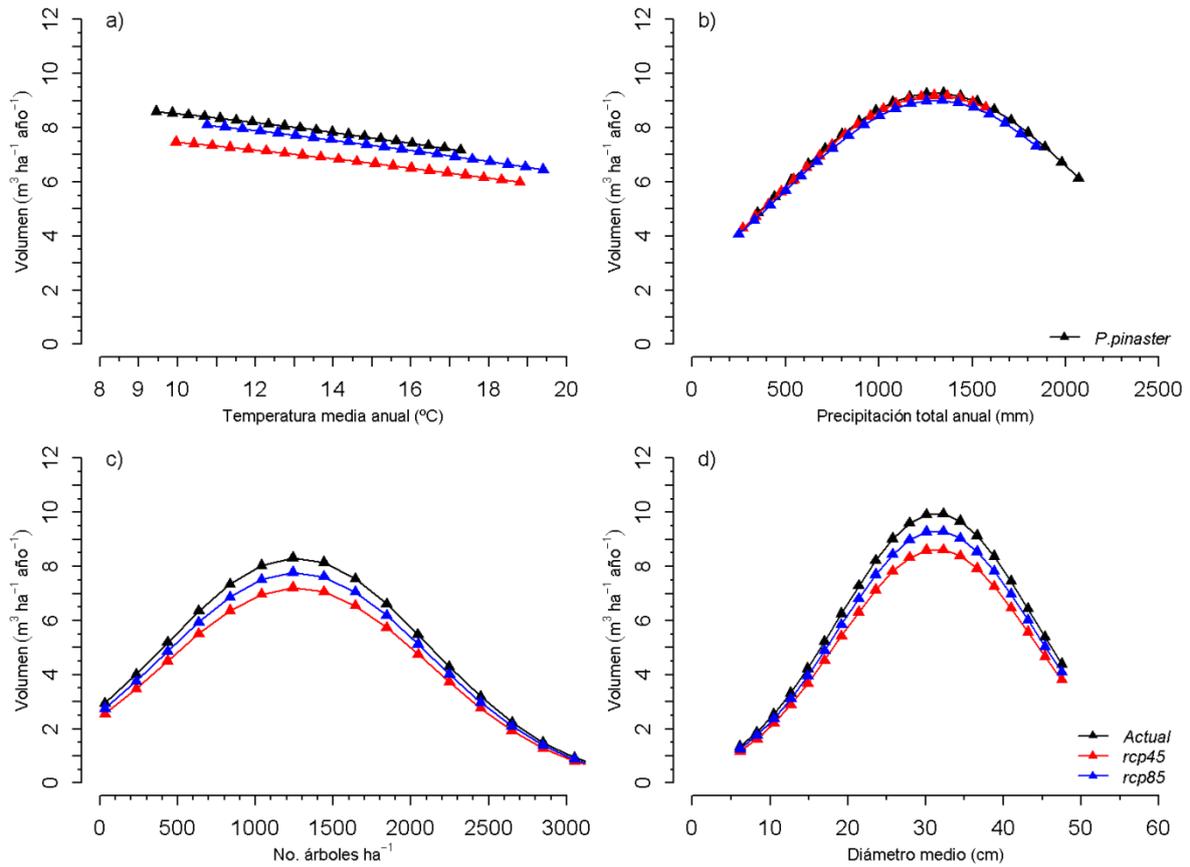


Figura 10. Predicción de la producción anual en términos de volumen (m³/ha*año) para *Pinus pinaster* en función de (a) la temperatura media, (b) precipitación total anuales, (c) densidad del rodal, y (d) tamaño medio del individuo en condiciones climáticas actuales (línea negra) y futuras (año 2070 y escenario rcp45 y rcp85; línea roja y azul respectivamente) según escenarios previstos por la AEMET.

MODELO PARA PINUS SYLVESTRIS

a. PREDICCIÓN EN CONDICIONES ACTUALES

Los resultados de la parametrización de la producción forestal potencial máxima mostraron una respuesta no lineal en la producción de volumen de madera a lo largo del gradiente de temperatura y precipitación para el pino silvestre. La respuesta de la producción del pino silvestre presentó una respuesta moderada a la temperatura, con una tendencia de marcado descenso en la producción de volumen de madera hacia elevadas temperaturas (Figura 11a). La respuesta con respecto a la precipitación presentó una tendencia de descenso leve hacia elevadas precipitaciones (Figura 11b). La tendencia obtuvo una forma de campana de Gauss cuando estudiamos la respuesta de la producción forestal en función de la densidad (Figura 11c) y del tamaño de los individuos (Figura 11d).

La predicción de la producción anual de **pino silvestre** en términos de volumen en el monte Vilarín en función del clima (precipitación y temperatura, ver Figura 11a y 11b), la estructura del rodal (dbh y densidad, ver Figura 11c y 11d), así como la diversidad en condiciones actuales fue de **13,05 m³/ha*año**. El valor para la comunidad autónoma de Asturias fue de **11,62 m³/ha*año**. Si comparamos el valor predicho con los datos de incremento anual de volumen con corteza (IAVC) (crecimiento corriente de volumen con corteza), que oscilan entre 9,3 y 19,6 m³/ha*año, observamos que el valor predicho se encuentra dentro del rango actual obtenido en el monte de estudio.

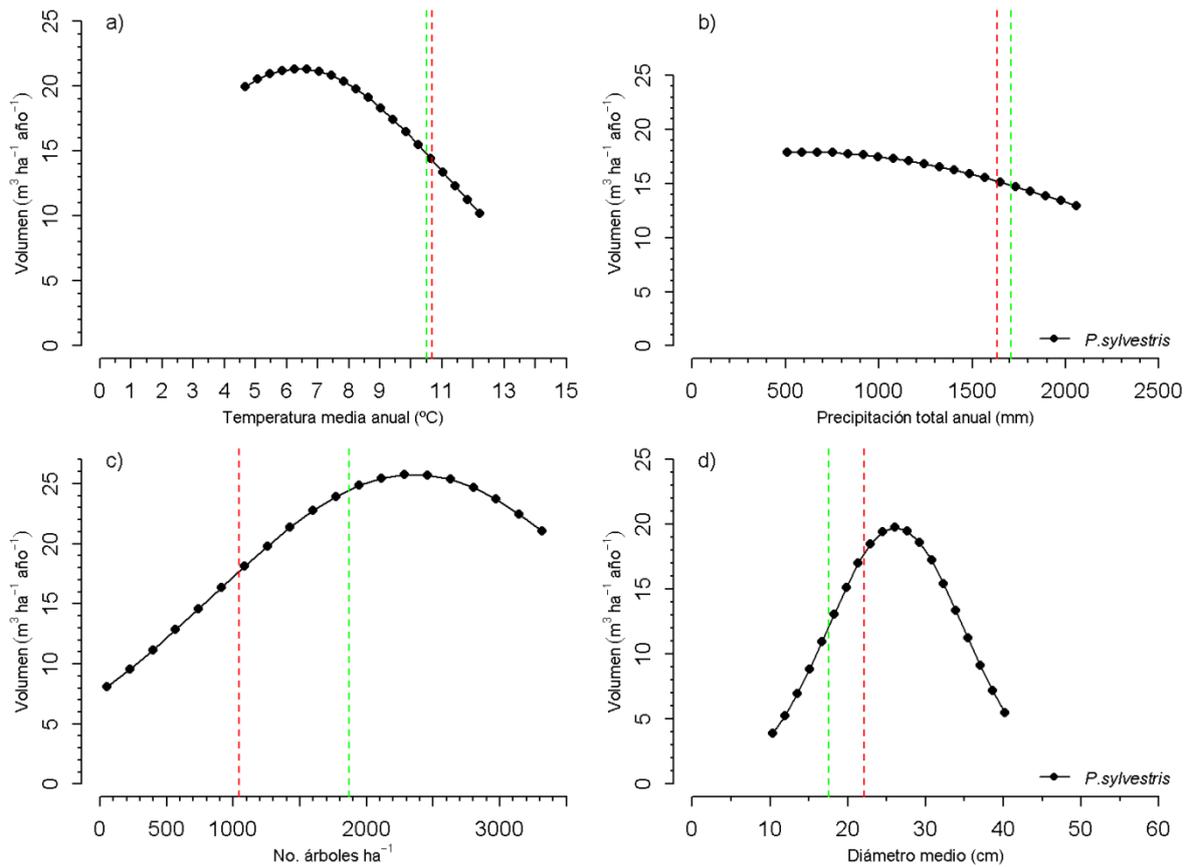


Figura 11. Predicción de la producción anual en términos de volumen (m³/ha*año) para *Pinus sylvestris* en función de (a) la temperatura media anual, (b) la precipitación total anual, (c) la densidad del rodal, y (d) el tamaño medio de los individuos. Las líneas verdes discontinuas indican las condiciones anuales de temperatura, precipitación, densidad o diámetro medio para la localización de estudio, el monte Vilarín. Las líneas rojas discontinuas indican las condiciones para la comunidad autónoma en las que se encuentra la localización de estudio, Asturias para el pino silvestre.

c. PREDICCIÓN EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las predicciones futuras de temperatura y precipitación de la AEMET para las localizaciones de estudio se describen a continuación (Tabla 4), así como las predicciones para la comunidad autónoma de Asturias, para los diferentes escenarios propuestos para el año 2050 y 2070.

Tabla 4. Descripción de las predicciones de temperatura y precipitación basadas en diferentes escenarios AEMET para la localización de estudio de Vilarín y la Comunidad Autónoma de Asturias.

Escenario	Temperatura Media Anual					Precipitación Total Anual				
	Actual	2050	2050	2070	2070	Actual	2050	2050	2070	2070
		Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85		Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85
Monte Vilarín	10,75 ±5,35	9,63 ±6,20	11,67 ±6,64	11,37	12,00	1115	1540,78 ±78,64	1244,83 ±300,64	1031,66	1363,67
CCAA Asturias	10,69 ± 2,03	10,04± 2,08	12,15 ± 1,96	11,81 ± 2,06	12,31 ± 1,96	1360 ± 288,26	1674,16 ± 316	1195,25 ±220,35	1013,47 ±171,77	1536,61 ±257,77

Cuando proyectamos el modelo parametrizado con las condiciones climáticas, estructurales y de riqueza actuales en escenarios futuros (condiciones climáticas futuras en el año 2050 y **2070** y escenarios AEMET de emisiones rcp 4.5 y rcp 8.5) los valores obtenidos de producción forestal en términos de volumen oscilan entre 8,72 y 11,92 m³/ha*año para el pino silvestre en la comunidad autónoma de Asturias (Tabla 5). Estos valores suponen un descenso en la producción forestal que oscila entre el 18,50 y el 24,96 % en comparación con los obtenidos en condiciones actuales en aquellos escenarios de emisiones más pesimistas (rcp85). No obstante, el escenario menos pesimista rcp45 podría suponer un incremento de la producción del volumen cercano al 2,6%. Cuando proyectamos el modelo con las condiciones climáticas futuras para la localización de estudio los valores de producción forestal en términos de volumen se reducen hasta valores que oscilan los 11,49 y 7,73 m³/ha*año para el pino marítimo (Tabla 5). Estos valores de producción en términos de volumen podrían suponer un descenso de entre el 11,95 y el 40,77% de la producción forestal para la especie (Figura 12 y 13). Cabe mencionar que el escenario menos pesimista rcp45 podría incrementar la producción para el año 2050 en casi un 10%, aunque sufriría un descenso muy significativo dos décadas más tarde (Tabla 5).

Tabla 5. Descripción de las predicciones de producción de volumen expresado en m³/ha*año para el pino marítimo y su porcentaje de cambio (%) para cada uno de los escenarios AEMET para la localización de estudio de Vilarín y la Comunidad Autónoma de Asturias.

	Volumen (m ³ /ha*año)					Porcentaje de cambio (%)			
	Actual	2050	2050	2070	2070	2050	2050	2070	2070
		Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85
Vilarín (Asturias)	13,05	14,31	11,49	9,75	7,73	+9,66	-11,95	-25,29	-40,77
CCAA Asturias	11,62	11,92	8,72	11,64	9,47	+2,58	-24,96	+0,17	-18,50

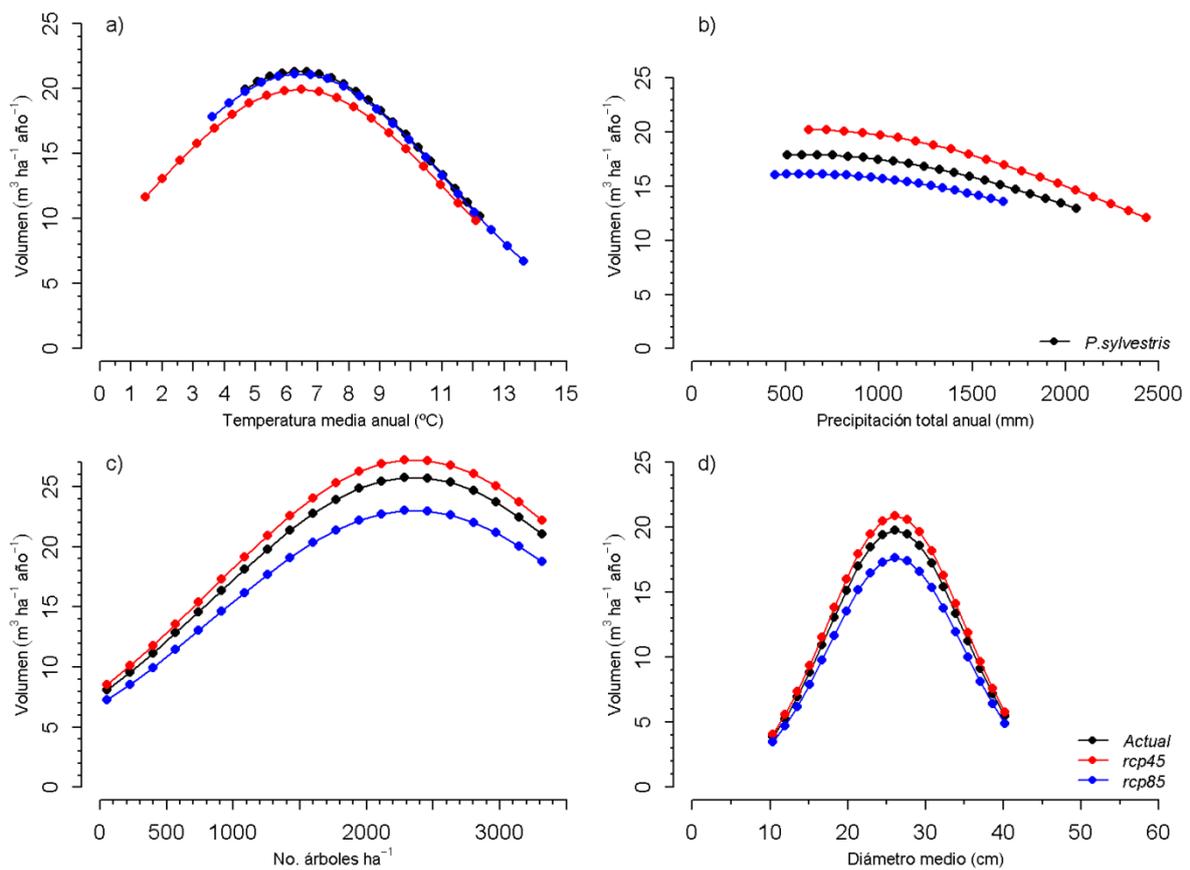


Figura 12. Predicción de la producción anual en términos de volumen (m³/ha*año) para *Pinus sylvestris* en función de (a) la temperatura media, (b) precipitación total anuales, (c) densidad del rodal, y (d) tamaño medio del individuo en condiciones climáticas actuales (línea negra) y futuras (año 2050 y escenario rcp45 y rcp85; línea roja y azul respectivamente) según escenarios previstos por la AEMET.

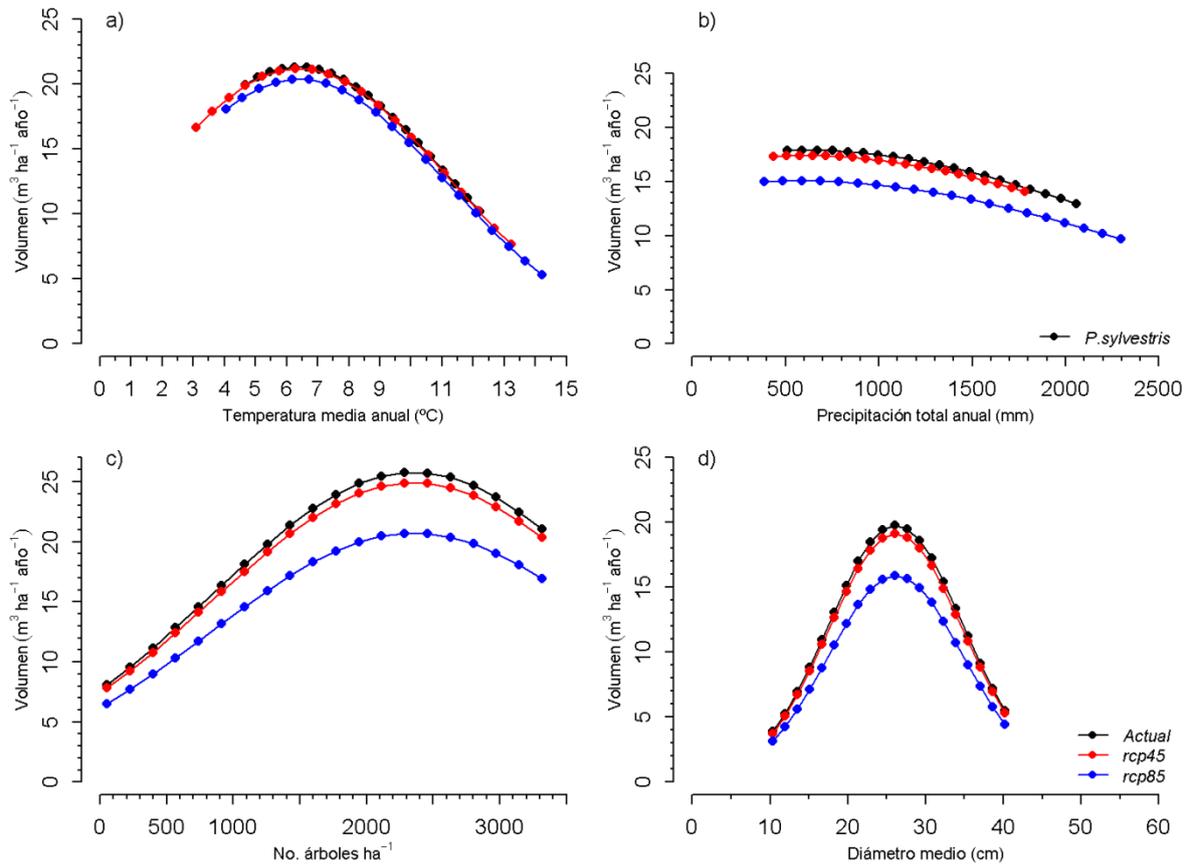


Figura 13. Predicción de la producción anual en términos de volumen ($\text{m}^3/\text{ha}\cdot\text{año}$) para *Pinus sylvestris* en función de (a) la temperatura media, (b) precipitación total anuales, (c) densidad del rodal, y (d) tamaño medio del individuo en condiciones climáticas actuales (línea negra) y futuras (año 2070 y escenario rcp45 y rcp85; línea roja y azul respectivamente) según escenarios previstos por la AEMET.

Tabla 6. Resumen de las predicciones para los montes de estudio y sus respectivas comunidades autónomas bajo condiciones climáticas actuales y escenarios de cambio climático aemet rcp45 y rcp85 proyectados para el 2050 y 2070.

		Volumen (m ³ /ha*año)					Porcentaje de cambio (%)			
		Actual	2050	2050	2070	2070	2050	2050	2070	2070
			Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85	Rcp45	Rcp85
Escala de monte	P. silvestre Vilarin	13,05	14,31	11,49	9,75	7,73	+9,66	-11,95	-25,29	-40,77
	P. marítimo Frades	9,59	9,19	8,15	9,85	9,23	-4,17	-15,01	+2,71	-3,75
Escala de CCAA	P. silvestre Asturias	11,62	11,92	8,72	11,64	9,47	+2,58	-24,96	+0,17	-18,50
	P. marítimo Galicia	9,30	8,55	9,12	9,15	8,97	-8,07	-1,94	-1,61	-3,55

En general los resultados de las proyecciones de los modelos de máxima verosimilitud indican que la producción forestal del pino marítimo podría verse afectada negativamente en Galicia y en concreto en el monte de Frades. Los efectos del incremento de la temperatura y reducción de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI podrían contribuir a reducir la producción forestal en Galicia entre un 1,61 y un 8,07%, en comparación con los valores de producción actuales. En concreto para el monte de estudio la producción forestal del pino marítimo podría verse reducida entre un 11,91 al 23,69%.

En el caso del pino silvestre los resultados de las proyecciones de los modelos calibrados mediante técnicas de máxima verosimilitud indican que la producción forestal podría verse afectada de forma negativa en Asturias y en concreto en el monte Vilarín en aquellos escenarios de emisiones más pesimistas (rcp85). Concretamente para estos escenarios de emisiones más agresivos, los efectos del incremento de la temperatura y reducción de la precipitación a lo largo del siglo XXI podrían contribuir a reducir la producción forestal en Asturias entre un 18,50 y un 24,96 %. Específicamente para el monte Vilarín este descenso de la producción podría encontrarse entre el 11,95 y el 40,77%.

3.2 MODELOS DE IDONEIDAD DE HÁBITAT- CÁLCULO DE LA EXPOSICIÓN DE LA ESPECIE

MODELO PARA PINUS PINASTER

Cuando proyectamos el modelo de idoneidad de hábitat parametrizado con las condiciones climáticas actuales en escenarios futuros (condiciones climáticas futuras en el año 2050 y 2070 y escenarios de emisiones rcp 4.5 y rcp 8.5 se obtuvo que la idoneidad del hábitat para el pino marítimo podría verse afectada de forma significativa a lo largo del siglo XXI. Por un lado, la idoneidad del hábitat podría verse mermada en zonas del sur y suroeste de la Península Ibérica, mientras que la idoneidad del hábitat podría aumentar en zonas del centro peninsular (Figura 14).

Cuando evaluamos el cambio de la idoneidad del hábitat del pino marítimo para el año 2050 y según el escenario de cambio climático **rcp45** se obtuvo que un **14.6%** del hábitat idóneo para el pino marítimo podría verse mermado, mientras que un **26.84%** del hábitat podría verse incrementado a nivel peninsular (Figura 15a). La proyección para ese mismo año en el escenario de cambio climático **rcp85** indicó que hasta un **16%** del hábitat idónea para el pino marítimo podría verse mermado, mientras que podría haber un incremento de un **40%** del hábitat idóneo para la especie a nivel peninsular (Figura 15c). Cuando evaluamos el cambio de la idoneidad del hábitat para el año 2070 y según el escenario de cambio climático **rcp45** se obtuvo que un **13,79 %** del hábitat idóneo para el pino marítimo podría verse mermado, mientras que un **33,85 %** del hábitat podría verse incrementado a nivel peninsular (Figura 15e). La proyección según el escenario rcp85 indicó que un **16,89%** del hábitat idóneo para el pino marítimo podría verse mermado, mientras que un **40,45%** del hábitat podría verse incrementado a nivel peninsular (Figura 15g).

A nivel de comunidad autónoma de Galicia y Asturias, zona donde se localiza el monte de Frades, podría no verse afectada y permanecer con un hábitat adecuado para la especie en el año 2050 (Figuras 15b, 15d, 15f, 15h). Para la proyección del escenario rcp45 en el año 2050 se obtuvo que un **4,46% del hábitat podría verse mermado**, mientras que un **29,06% del hábitat podría verse incrementado** para la especie en la región noroccidental (Figura 15b). Según los cálculos de cambio de la idoneidad del hábitat, para el escenario de cambio

climático rcp85 se obtuvo que un **5,20% del hábitat podría verse mermado** en el año 2050, mientras que un **33,11% del hábitat podría verse incrementado** para la especie en la región noroccidental (Figura 15d). La proyección en el año 2070, y según el escenario rcp45 indicó que un **4,87% del hábitat podría verse mermado**, mientras que un **32,37% del hábitat podría verse incrementado** para la especie *Pinus pinaster* en esta región noroccidental de la península (Figura 15f). La proyección para ese mismo año y según el escenario rcp85 se obtuvo que un **5,31% del hábitat podría verse mermado**, mientras que un **38,57% del hábitat podría verse incrementado** para la especie *Pinus pinaster* en esta región noroccidental de la península (Figura 15h).

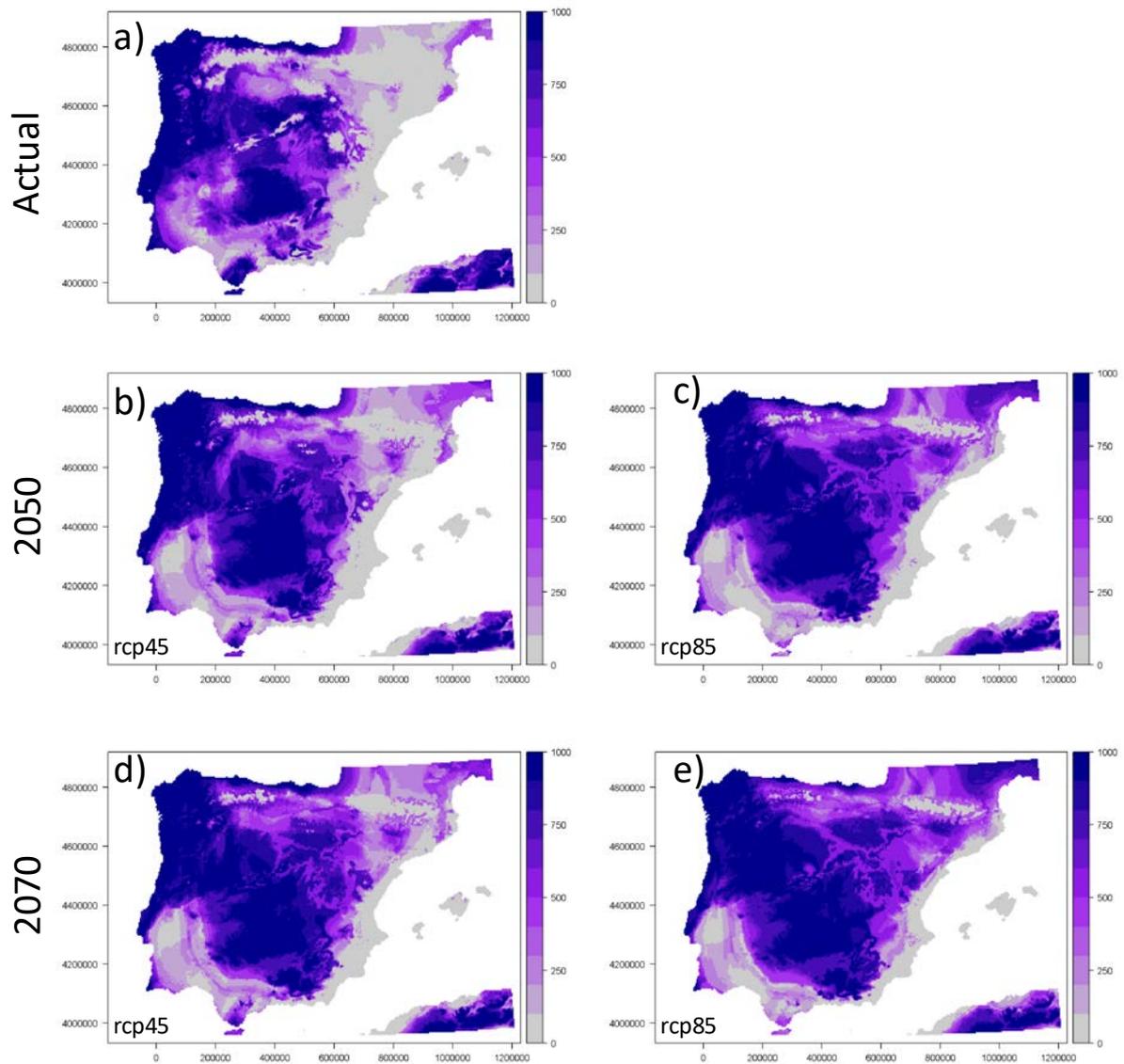


Figura 14. Idoneidad del hábitat para *Pinus pinaster* en condiciones climáticas a) actuales, b) en 2050 bajo predicción de cambio climático según el escenario rcp45, c) en 2050 bajo predicción de cambio climático según el escenario rcp85, d) en 2070 bajo predicción de cambio climático según el escenario rcp45 y e) en 2070 bajo predicción de cambio climático según el escenario rcp85. La escala de color indica que para colores más oscuros la idoneidad es mayor.

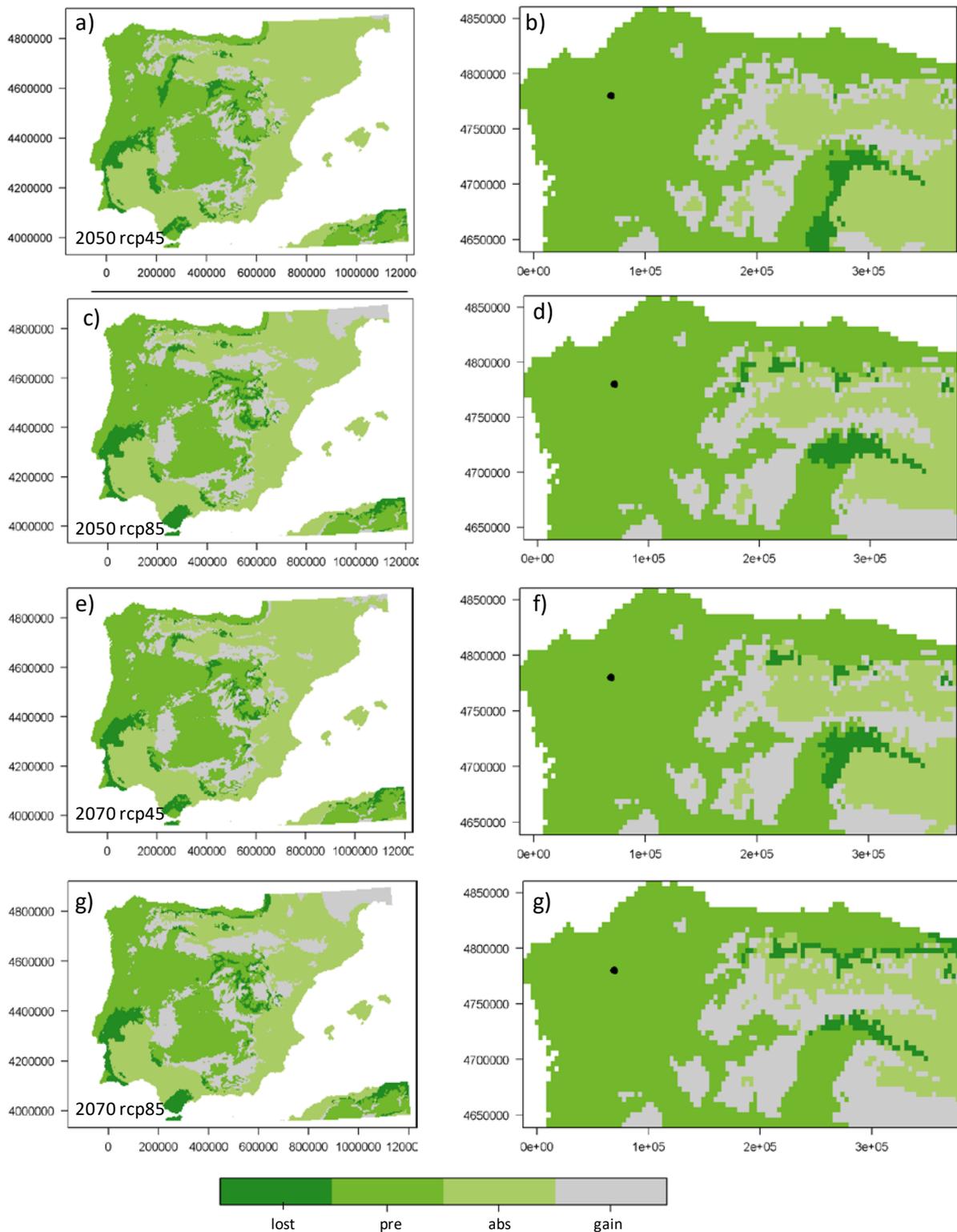


Figura 15. Cambio de la idoneidad del hábitat para *Pinus pinaster* en condiciones de cambio climático a nivel peninsular y para la zona noroeste peninsular para (a, b) 2050 según escenario rcp45, (c, d) 2050 según escenario rcp85, (e, f) 2070 según escenario rcp45, y (g, h) 2070 según escenario rcp85. El punto negro indica la localización del monte de Frades. La barra inferior indica pérdida de la idoneidad del hábitat para la especie (lost), idoneidad del hábitat adecuado para la especie (pre), ganancia de la idoneidad del hábitat para la especie (gain) y ausencia de idoneidad del hábitat para la especie (abs).

MODELO PARA PINUS SYLVESTRIS

Cuando proyectamos el modelo de idoneidad de hábitat parametrizado con las condiciones climáticas actuales en escenarios futuros de emisiones rcp 4.5 y rcp 8.5 para los años 2050 y 2070 se obtuvo que la idoneidad del hábitat para el pino silvestre podría verse afectada de forma muy significativa a lo largo del siglo XXI. Por un lado, la idoneidad del hábitat podría verse altamente mermada en zonas elevadas del norte, centro y sur y peninsular sin obtenerse ninguna ganancia en la idoneidad del hábitat en ningún otro territorio (Figura 16).

Según los cálculos de cambio de la idoneidad del hábitat para el 2050 basados exclusivamente en parámetros climáticos, se obtuvo que un **58%** del hábitat podría verse mermado para el pino silvestre a nivel peninsular, sin encontrarse ninguna ganancia de hábitat según el **escenario de emisiones rcp45** (Figura 17a). Según el **escenario rcp85**, la proyección para ese mismo año 2050 indicó que casi un **76%** del hábitat podría verse mermado para el pino silvestre a nivel peninsular, sin encontrarse de nuevo ninguna ganancia de hábitat (Figura 17c). Las proyecciones para el año 2070, y según el **escenario de emisiones rcp45** mostraron que el porcentaje de pérdida de hábitat podría incrementarse hasta el **71%** a nivel peninsular, sin encontrarse ninguna ganancia de hábitat (Figura 17e). Pero para el **escenario rcp85** el porcentaje de pérdida de hábitat proyectado para el año 2070 podrían ascender hasta el **82,31%** del hábitat a nivel peninsular, sin encontrarse ninguna ganancia de hábitat (Figura 17g).

La zona noroccidental donde se localiza el monte Vilarín podría verse afectada negativamente y reducir la idoneidad del hábitat para la especie en los próximos años. Así, para el año 2050 y según el **escenario de cambio climático rcp45** el **46%** del hábitat podría perder su idoneidad para el pino silvestre en la región noroccidental de la península (Figura 17b). En ese mismo año 2050 y según el **escenario de cambio climático rcp85** se obtuvo que un **59,26%** del hábitat podría verse mermado para la especie en esta región noroccidental de la península (Figura 17d). Las proyecciones para el año 2070 y según el **escenario de cambio climático rcp45** indicaron que un **58%** del hábitat idóneo para el pino silvestre podría verse mermado en la región noroccidental de la península (Figura 17f), llegando a valores de pérdida cercanos al **77%** del hábitat según el escenario más pesimista rcp85 (Figura 17h).

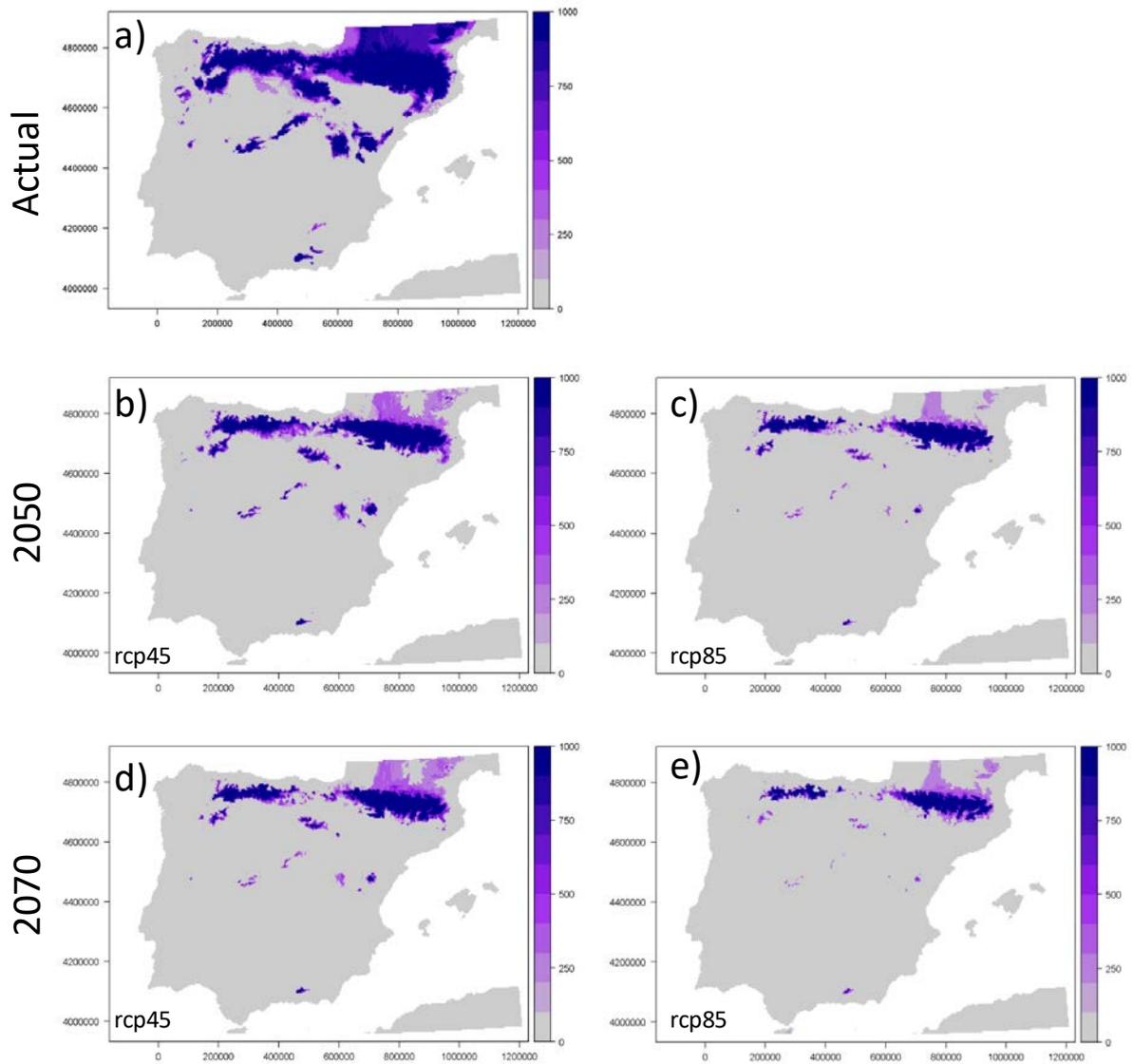


Figura 16. Idoneidad del hábitat para *Pinus sylvestris* en condiciones climáticas a) actuales, b) en 2050 según el escenario rcp45, c) en 2050 según el escenario rcp85, d) en 2070 según el escenario rcp45 y e) en 2070 según el escenario rcp85. La escala de color indica que para colores más oscuros la idoneidad es mayor.

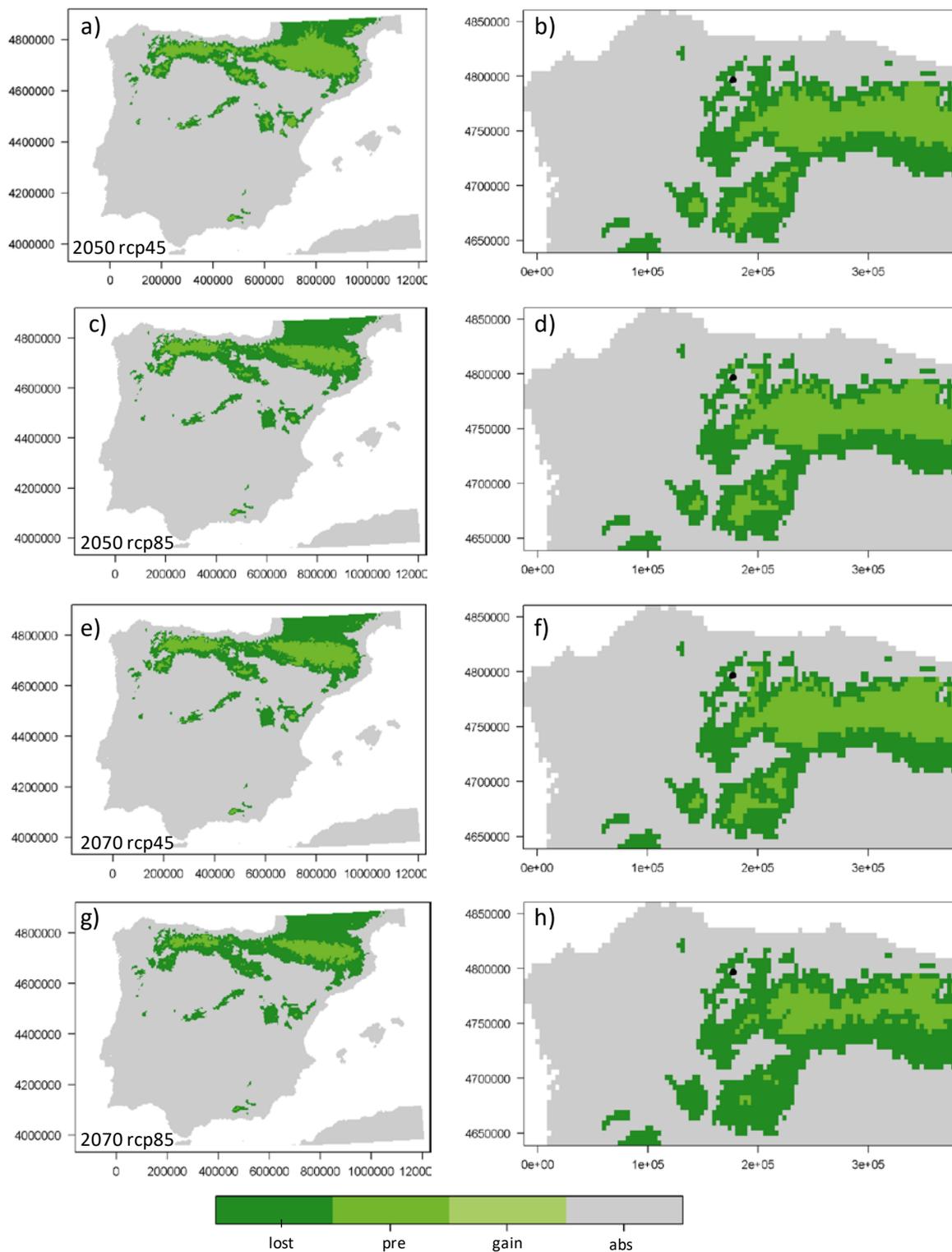


Figura 17. Cambio de la idoneidad del hábitat para *Pinus sylvestris* en condiciones de cambio climático a nivel peninsular y para la zona noroeste peninsular (a, b) para 2050 según escenario rcp45, (c, d) para 2050 según escenario rcp85, (e, f) para 2070 según escenario rcp45, y (g, h) para 2070 según escenario rcp85. El punto negro indica la localización en el mapa del monte Vilarín. La barra inferior indica pérdida de la idoneidad del hábitat para la especie (lost), idoneidad del hábitat adecuado para la especie (pre), ganancia de la idoneidad del hábitat para la especie (gain) y ausencia de idoneidad del hábitat para la especie (abs).

Tabla 7. Resumen de los resultados de los modelos de máxima verosimilitud y de los modelos de idoneidad de especies para los escenarios de emisiones rcp45 y rcp85, proyectado para los años 2050 y 2070.

Escenario cambio climático	Especie	Escala	Producción media (m ³ *ha ⁻¹ año ⁻¹)	Cambio neto en producción (%)	Reducción idoneidad del hábitat a nivel nor-occidental (%)	Incremento idoneidad del hábitat a nivel nor-occidental (%)	Cambio neto en idoneidad del hábitat (%)
Actualidad	<i>P.sylvestris</i>	Monte	13,05	-	-	-	-
Actualidad	<i>P.sylvestris</i>	Asturias	11,62	-	-	-	-
2050RCP45	<i>P.sylvestris</i>	Monte	14,31	+9,66	-	-	-
2050RCP45	<i>P.sylvestris</i>	Asturias	11,92	+2,58	46,17	0	-46,17
2050RCP85	<i>P.sylvestris</i>	Monte	11,49	-11,95	-	-	-
2050RCP85	<i>P.sylvestris</i>	Asturias	8,72	-24,96	59,26	0	-59,26
2070RCP45	<i>P.sylvestris</i>	Monte	9,75	-25,29	-	-	-
2070RCP45	<i>P.sylvestris</i>	Asturias	11,64	+0,17	58,02	0	-58,02
2070RCP85	<i>P.sylvestris</i>	Monte	7,73	-40,77	-	-	-
2070RCP85	<i>P.sylvestris</i>	Asturias	9,47	-18,50	77,11	0	-77,11
Actualidad	<i>P.pinaster</i>	Monte	7,47	-	-	-	-
Actualidad	<i>P.pinaster</i>	Galicia	9,30	-	-	-	-
2050RCP45	<i>P.pinaster</i>	Monte	6,14	-17,80	-	-	-
2050RCP45	<i>P.pinaster</i>	Galicia	8,55	-8,07	4,46	29,06	+24,59
2050RCP85	<i>P.pinaster</i>	Monte	5,70	-23,69	-	-	-
2050RCP85	<i>P.pinaster</i>	Galicia	9,12	-1,94	5,20	33,11	+27,91
2070RCP45	<i>P.pinaster</i>	Monte	6,58	-11,91	-	-	-
2070RCP45	<i>P.pinaster</i>	Galicia	9,15	-1,61	4,87	32,37	+27,51
2070RCP85	<i>P.pinaster</i>	Monte	6,17	-17,40	-	-	-
2070RCP85	<i>P.pinaster</i>	Galicia	8,97	-3,55	5,31	38,57	+33,26

3.3 CÁLCULO DEL RIESGO

Se calculó el riesgo como el producto de la vulnerabilidad asociadas a los cambios potenciales en la producción y la vulnerabilidad asociadas a los cambios netos en la idoneidad del hábitat. Para la segunda variable solo se consideran la reducción en la idoneidad del hábitat, puesto que los cambios netos positivos no suponen un riesgo, pero sí lo harán aquellas zonas en las que se produzca una merma del hábitat apto para la especie. Cuando se combinaron ambos valores de vulnerabilidad, sin aplicar ningún factor de ponderación que pueda amortiguar o castigar el valor de vulnerabilidad, se obtuvieron unos valores de riesgo combinado que oscilaron entre un 0,08 y un 0,37% para el pino marítimo, mientras que en el caso del pino silvestre los valores de riesgo oscilaron entre el 0,1 y el 13,86% (Tabla 8).

Tabla 8. Cálculo del riesgo asociado a la producción forestal y hábitat para cada una de las especies de estudio y para los escenarios de emisiones rcp45 y rcp85, proyectado para los años 2050 y 2070.

Escenario cambio climático	Especie	Escala	Producción media (m ³ *ha-1 año-1)	Cambio neto producción (%)	Reducción idoneidad del hábitat (%)	Cambio neto idoneidad hábitat (%)	Vulnerabilidad 1	Vulnerabilidad 2	R
Actualidad	<i>Psyl</i>	Asturias	11,62			-	-	-	-
2050RCP45	<i>Psyl</i>	Asturias	11,92	+2,58	46,17	-46,17	-0,0258	0,4617	0,0119
2050RCP85	<i>Psyl</i>	Asturias	8,72	-24,96	59,26	-59,26	0,2496	0,5926	0,1352
2070RCP45	<i>Psyl</i>	Asturias	11,64	+0,17	58,02	-58,02	-0,0017	0,5802	0,0010
2070RCP85	<i>Psyl</i>	Asturias	9,47	-18,50	77,11	-77,11	0,1850	0,7711	0,1386
Actualidad	<i>Ppin</i>	Galicia	9,30			-	-	-	-
2050RCP45	<i>Ppin</i>	Galicia	8,55	-8,07	4,46	+24,59	0,0807	0,0456	0,0037
2050RCP85	<i>Ppin</i>	Galicia	9,12	-1,94	5,20	+27,91	0,0194	0,0520	0,0010
2070RCP45	<i>Ppin</i>	Galicia	9,15	-1,61	4,87	+27,51	0,0161	0,0487	0,0008
2070RCP85	<i>Ppin</i>	Galicia	8,97	-3,55	5,31	+33,26	0,0355	0,0531	0,0019

4 | **Discusión e Identificación de los impactos asociados al cambio climático en las especies de estudio**

En este trabajo se ha evaluado la vulnerabilidad de la producción forestal del pino marítimo y del pino silvestre ante los distintos escenarios climáticos esperados bajo predicciones de cambio climático a lo largo del presente siglo. Para ello se han compilado datos de crecimiento y producción forestal en 40.331 parcelas permanentes procedentes del IFN3 e IFN4 y seleccionado aquellas pertenecientes a cada una de las regiones de estudio. Se ha cuantificado el cambio potencial en la producción de madera, los cambios potenciales en la idoneidad del hábitat así como el riesgo asociado a los cambios anteriores y acciones concretas.

RIESGO 1

En general encontramos que la producción forestal del pino marítimo y del pino silvestre podría verse afectada negativamente bajo condiciones de cambio climático, aunque los cambios podrían ser más negativos para el pino silvestre en aquellos escenarios de emisiones más elevadas.

En concreto, nuestros análisis mostraron que los efectos del incremento de la temperatura y reducción de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI podrían contribuir a reducir la producción forestal del pino marítimo de forma leve en Galicia (entre un 1,61 y un 8,07%) y de forma moderada en el monte de Frades (hasta un 23,69%), en comparación con los valores de producción actuales. El principal limitante del crecimiento del pino marítimo es la escasez de agua (Bravo-Oviedo et al 2010). De esta manera, las reducciones en la precipitación esperadas en las próximas décadas en la región de Galicia podrían por lo tanto tener un efecto negativo en el crecimiento de la especie. No obstante, dentro de la región de Galicia, la zona Norte podría presentar un menor déficit de agua, debido a la presencia de menores temperaturas, nieblas recurrentes y un mayor volumen de precipitaciones en comparación con aquellas poblaciones situadas en el Sur de esta región, lo que podría limitar el efecto negativo del clima en los próximos años en mayor medida (Rozas et al. 2010). Sin embargo, la

sensibilidad al clima del pino marítimo podría ser menor a mayores altitudes como consecuencia de una estación de crecimiento más corta derivado de unas temperaturas más bajas (Leal et al 2008). De hecho, algunos estudios de modelización a nivel peninsular sugieren que las poblaciones del pino marítimo localizadas en el centro-norte peninsular, situadas por encima de los 1000 m s.n.m., podrían no sufrir los efectos negativos del clima en las próximas décadas, incluso presentar cambios positivos en la productividad (Bravo-Oviedo et al 2010). Esta sensibilidad en las zonas más bajas podría explicar en parte el mayor riesgo asociado a las poblaciones del monte de Frades localizado a bajas altitudes, de entre los 350 y los 450 m s.n.m., en comparación con la media para toda Galicia y con los resultados de otros estudios a nivel nacional.

RIESGO 2

En el caso del pino silvestre la producción forestal podría verse mermada de forma moderada en Asturias (entre un 18,50 y el 24,96%) y de forma moderada-alta en el monte Vilarín (hasta un 40,77%) en aquellos escenarios de emisiones más pesimistas (rcp85). Estos resultados concuerdan con estudios recientes que sugieren que el pino silvestre podría sufrir un declive en el crecimiento en el rango sur de su distribución global, en aquellas localizaciones situadas a baja altitud (Matías & Jump 2014, Matías et al 2017). Cabe mencionar que el rango altitudinal de la especie en España oscila entre los 1000 y 2000 m, por lo que la distribución de la especie en el monte Vilarín de entre 559 m y una cota máxima de 895 m podría considerarse como una altitud baja. Por otro lado, nuestros resultados sugieren que a corto plazo (p. ej. 2050) y bajo los escenarios de emisiones menos agresivos (p. ej. rcp4.5) el crecimiento del pino silvestre podría verse ligeramente incrementado. La escasez de agua es uno de los principales limitantes en el crecimiento del pino silvestre (Sanchez-Salguero et al. 2015). Sin embargo, las predicciones de la precipitación total para las próximas décadas y su distribución a lo largo del año en la localización de estudio no presentan valores significativamente inferiores a los actuales, y sugiere que los factores que modulan el crecimiento del pino silvestre en la zona de estudio a corto plazo podrían estar más relacionados con los cambios en la temperatura. La predicción del aumento de temperatura para el 2050 en la zona de estudio es leve, lo que podría explicar el efecto positivo en el crecimiento de la especie. No obstante, un incremento más severo en las temperaturas (+ 2°C) podría sobrepasar el umbral óptimo para el crecimiento de la especie y desembocar en un efecto negativo en el crecimiento. Todos estos resultados sugieren que el efecto del cambio climático en individuos de pino silvestre localizados en aquellos lugares donde el cambio en

el clima sea menor (p. ej. zonas de mayor altitud) podrían beneficiarse de los cambios esperados en el clima en los próximos años. No obstante, se recomienda un estudio con dendrocronología para detectar posibles cambios en el crecimiento en los últimos años en las zonas bajas en comparación con las zonas altas en la zona de estudio. Hay que tener en cuenta que estos resultados consideran exclusivamente el efecto del clima, sin evaluar el efecto añadido de cambios en las comunidades de patógenos o herbívoros o de las especies invasoras entre otros, lo que podría suponer una compensación adicional.

RIESGO 3

Además del detrimento en la producción forestal, observamos que la idoneidad del hábitat podría presentar cambios diferenciados para cada una de las especies de estudio. Así, el pino marítimo podría presentar un cambio neto positivo, donde las ganancias de idoneidad de hábitat podrían ser superiores a las pérdidas. Estos resultados concuerdan con previos estudios de modelización que sugieren que la idoneidad del hábitat para las poblaciones de pino marítimo localizadas en el centro-norte de la península ibérica podrían no sufrir un declive asociado a los efectos negativos del clima en las próximas décadas, incluso presentar cambios positivos en la idoneidad y productividad (Bravo-Oviedo et al 2010). No obstante, cuando estos modelos son combinados con el efecto añadido de algunos patógenos como *Fusarium circinatum*, la idoneidad para la especie podría verse afectada de forma más negativa (Serra-Varrela et al 2017).

Cabe resaltar que aunque la idoneidad del hábitat pueda verse incrementada de forma neta en toda la región noroccidental, las pérdidas de idoneidad de hábitat actuales podrían oscilar entre el 4,5 y el 5,3% en la región de estudio, lo cual podría traducirse en pérdidas de hábitat que oscilen entre las 65,000 y 77,000 hectáreas. Esta información es relevante, porque indicaría que una superficie considerable habitada por la especie en la actualidad no presentaría las condiciones óptimas para el desarrollo de la especie, pudiéndose ver influenciados aspectos demográficos que van desde la regeneración, el crecimiento o la mortalidad. Estos resultados combinados con los cambios potenciales en el crecimiento forestal en términos de volumen podrían significar cambios significativos en la productividad del pino marítimo en zonas concretas de la comunidad de Galicia.

RIESGO 4

Por otro lado, detectamos que la idoneidad del hábitat del pino silvestre podría verse afectada muy negativamente en toda la península Ibérica y en concreto en la región noroccidental bajo condiciones de cambio climático, con pérdidas que podrían oscilar entre el 46 y 77% para los escenarios menos y más agresivos respectivamente. Estas pérdidas de idoneidad irían asociadas a las zonas de menor elevación de la distribución actual de la especie, donde las nuevas condiciones de temperatura y precipitación se encontrarían fuera del umbral óptimo para el desarrollo de la especie. Estos resultados concuerdan con las predicciones realizadas por otros autores (p. ej. Matías et al 2017), donde los efectos negativos del clima de las próximas décadas para la especie podrían tener consecuencias en aquellas localizaciones de menor elevación.

RIESGO 5

Finalmente encontramos que el riesgo asociado a la producción forestal e idoneidad del hábitat bajo escenarios de cambio climático es leve para el pino marítimo incrementándose hasta moderado para el pino silvestre. Este riesgo considera únicamente las condiciones ecológicas para el desarrollo y supervivencia de las especies forestales, sin considerar las actuaciones de gestión llevadas a cabo en cada uno de los montes. Por ello, para minimizar el riesgo asociado al cambio climático de las especies estudiadas y en las localizaciones de estudio, las actuaciones de gestión pueden tener un efecto clave. Por ello, a continuación, se describen una serie de recomendaciones a tener en cuenta en los próximos años.

5 | Recomendaciones para la gestión

En base a los resultados obtenidos tras la implementación de los modelos empíricos de producción forestal, los modelos de idoneidad de hábitat y el cálculo de riesgos, se exponen a continuación algunas recomendaciones para la gestión en cada una de las dos localizaciones piloto.

Las recomendaciones de gestión para la adaptación al cambio climático deben ir dirigidas hacia diferentes escalas temporales: el logro de objetivos a corto plazo (p. ej. la disminución del riesgo inmediato de un peligro para que no se materialice en un impacto), pero también a largo plazo hacia la promoción de la resiliencia. Asimismo, las recomendaciones de gestión se establecen a diferentes escalas espaciales: a nivel de individuo, nivel de rodal y de paisaje.

Localización 1: Monte de Frades (Galicia), *Pinus pinaster*

ASPECTOS DESTACABLES DE LA GESTIÓN FORESTAL DEL MONTE DE FRADES

El principal destino del monte de Frades es el productor y el método de ordenación utilizado en la actualidad es el de Tramo único, que es el método más flexible dentro de los de Tramos Periódicos. Toda la masa del cuartel va a ser tratada a un mismo turno o a turnos diferentes en razón de especie y/o calidad de estación, pero en superficies amplias, que permitan que se dé la condición de extensión suficiente para dar cabida a todas las clases de edad que componen el turno. Las actuaciones silvícolas se darán a nivel de cuartel.

El monte está compuesto por 18 cantones agregados en un único cuartel, que son las unidades básicas de referencia espacial y unidades mínimas de gestión de carácter permanente.

Los cantones además presentan una máxima homogeneidad interna posible atendiendo preferentemente a la calidad de estación, homogeneidad de especies, edades y espesuras.



Foto 3: Monte de Frades

El principal tratamiento selvícola en este monte es el de cortas a hecho seguidas de regeneración natural o artificial tras la corta. Las cortas a hecho puede tener un impacto considerable en el balance hídrico dentro del área donde se aplica (Vertessy et al 1996) así como en el suelo y el microclima, pero que utilizado de forma adecuada y a una escala mayor puede favorecer la heterogeneidad espacial, mediante la creación por ejemplo de claros que pueden beneficiar a cierta fauna o al regenerado (Keenan & Kimmins 1993). También se aplican cortas y clareos de mejora, desbroces, trituración de restos de corta/poda, preparación del terreno previa a la plantación, reposición de marras y fertilización.

El pino marítimo es una especie que se reproduce bien por semilla, sin posibilidad de brote de cepa, y que además posee en general una buena regeneración natural. La forma fundamental de masa elegida para esta especie será la de monte alto regular. En caso de que se juzgue que la regeneración natural puede ser insuficiente, podrá recurrirse a la regeneración artificial mediante plantación. La silvicultura es denominada multiproducto, que se fundamenta en conseguir la comercialización de todos los productos obtenidos en la masa forestal. El turno

es de 25 a 35 años para el pino marítimo, pero a efectos de planificación se considera una edad de 30 años.

RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA ECOLÓGICO

Los principales resultados obtenidos tras la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de la producción forestal del pino marítimo en la región de Galicia ante los distintos escenarios de cambio climático sugieren una reducción en la producción forestal de entre un 1,61 y un 8,07% en Galicia y hasta un 23,69% en el monte de Frades y unas pérdidas de idoneidad de hábitat que podrían oscilar entre el 4,5 y el 5,3% en la región de estudio. Ante estos resultados, y desde el punto de vista ecológico de la especie, se exponen a continuación algunas recomendaciones para la gestión en el monte de estudio.

Cambios relativos a la especie o genotipo

Un posible efecto de los cambios asociados al clima en los próximos años es el descenso de la producción forestal del pino marítimo en Galicia. Un alto nivel de diversidad confiere a las especies un mayor potencial de adaptación genético (Fady et al., 2015). Por ello se recomienda **mantener y fomentar la diversidad genética** de la masa en los próximos años. En concreto, para conseguir una diversidad genética elevada, tanto a nivel de fenotipo como a nivel de genotipo se recomienda mantener individuos diversos dentro de un mismo rodal (p. ej. morfotipos que presenten variabilidad en el aspecto de las hojas, porte, foliación, etc.).

Aunque la regeneración del pino marítimo en el monte de Frades es principalmente natural, si la diversidad presente fuese baja se recomienda incorporar semilla de variedades locales. Los ensayos de procedencia de la especie pueden proporcionar los criterios necesarios para seleccionar los genotipos más adecuados para el área concreta.

En el caso de detectarse signos que sugieran una falta de vitalidad o estrés asociados al aumento de temperatura o reducción en la precipitación, las estrategias podrán ir dirigidas a promover cambios en la composición de los bosques hacia genotipos o incluso especies en los casos más severos, mejor adaptados a las condiciones pronosticadas en climas futuros. Estas estrategias pueden incluir acciones in-situ, mediante el uso de especies existentes, o ex-situ, mediante el uso de la migración asistida (Martín-Alcón et al., 2016; Mason y Connolly, 2014).

Cambios estructurales a nivel de rodal

El método de ordenación de tramo único utilizado en el monte de Frades posee cierta rigidez dada su escasa flexibilidad, la tendencia hacia masas regulares y la dificultad de la existencia de varias clases de edad en una misma unidad de gestión, lo cual dificulta la heterogeneidad espacial y la diversificación estructural. Los riesgos previsibles provocados por el cambio climático de un descenso en la producción forestal asociado a los cambios de temperatura y precipitación esperados, podrían llevar asociados la acción de las plagas y enfermedades, el aumento de la intensidad de los incendios y los efectos de los vendavales asociados al tipo de masa homogénea, por lo que la **heterogeneidad espacial y la diversificación estructural** a escala de paisaje podría ayudar a reducir los riesgos.

Para reducir los riesgos en la producción asociados al cambio climático sería recomendable incluir modificaciones en la forma fundamental de la masa de forma total o parcial en el monte. Así la forma fundamental es monte alto regular y masa pura, de forma que pudiera transformarse parcialmente en una masa más irregular. Para conseguir tan fin, la incorporación de cambios en el método de cortas, escalonando en la medida de lo posible las cortas tanto espacial como temporalmente y tendiendo hacia la realización de **cortas a hecho en dos tiempos**, que permitiría dejar una reserva de árboles padre tras la primera corta, y además favorecer la heterogeneidad espacial. En este caso y teniendo en cuenta que el pino marítimo es una especie principalmente heliófila, se recomienda establecer la cortas a hecho en dos tiempos por bosquetes, de forma que los árboles padre quedan agregados en bosquetes de superficies moderadas, dejando un espacio abierto suficiente para la regeneración. Además, se recomienda la conservación de pies padre que presenten un buen desarrollo de copa y favorezcan el desarrollo de los estadios iniciales de pino marítimo. Esta medida podría llevar asociada una mayor complejidad para la organización y gestión de las cortas, aunque con una planificación adecuada se podrían optimizar al máximo los esfuerzos.

Otras actuaciones dirigidas a favorecer la diversidad estructural de la masa podrían ir dirigidas hacia la promoción gradual de rodales o corredores con **heterogeneidad funcional** (con más de una especie, al menos una conífera y una frondosa). Los bosques mixtos a nivel de especie, tipo funcional, o genotipo presentan una mayor productividad, multifuncionalidad y valor ecológico en comparación con los bosques puros (Riofrío et al 2017, Nunes et al. 2013). Además, los bosques mixtos pueden mostrar una mayor resistencia y capacidad de

recuperación ante impactos ya que mediante el conocido como efecto “portafolio” es más probable que una comunidad funcionalmente diversa presente algún tipo funcional resistente o resiliente a un determinado impacto. En concreto, la incorporación de rodales o corredores de bosque mixto con especies reduzcan la competencia por los recursos con el pino marítimo, podría ayudar a diversificar los recursos existentes, y por lo tanto favorecer el desarrollo de ambas especies. En bosques de pino marítimo, **heterogeneidad estructural** que incorpore especies **de diferente porte** parece ser más importante que solo la incorporación de otra especie, ya que la influencia de la estructura es mayor que la composición específica. Esto sugiere que el crecimiento en masas mixtas es más dependiente del tamaño de los individuos que de la especie de los competidores, y en el caso concreto del pino marítimo podría deberse en parte a su alta intolerancia a la sombra (Riofrío et al 2016). Por ello, introducir especies de menor porte, como frondosas (p. ej. robles) es recomendable. Para favorecer la diversidad estructural de la masa se recomienda asimismo favorecer la diversidad del estrato arbustivo en la medida de lo posible, siempre que esto no suponga un efecto contraproducente contra la respuesta a la escasez de agua.

Asimismo, puede ser conveniente el **control de la densidad y de la estructura** a escala de rodal para aumentar la salud y el valor de la masa en pie sobre todo a partir de los cuatro o cinco años de edad. Así, las densidades actuales con valores cercanos a 796 ind/ha, bastante por debajo de la media española para los bosques de pino marítimo, con valores de 1293 ind/ha, se consideran adecuadas para promover la resiliencia de la masa ante condiciones climáticas de mayor temperatura y menor precipitación. No obstante, es recomendable controlar estos valores, que pueden ser alterados con el tiempo.

Medidas a nivel de paisaje

Acciones encaminadas a la prevención de incendios a escala de paisaje, que promuevan reducir la severidad de los mismos pueden ser críticas. Así, asegurar la **discontinuidad entre copa y sotobosque**, realizando cortas controladas de sotobosque y de las ramas inferiores de los árboles, así como la introducción del pastoreo puede ayudar a reducir la severidad de los incendios en el caso de que se produzcan. Es importante continuar con un sistema de gobernanza que implique a todos los actores locales como ganaderos, cazadores, madereros, valor recreativo local y atractivo para visitantes externos. Aunque debido al cambio climático los incendios forestales es previsible que se hagan más intensos y de mayor tamaño (mega incendios) los factores sociales seguirán siendo un factor determinante.

Localización 2: Monte Vilarín (Asturias), *Pinus sylvestris*

ASPECTOS DESTACABLES DE LA GESTIÓN FORESTAL DEL MONTE VILARÍN

El monte está organizado en dos unidades de gestión (cuarteles), siendo el cuartel 1 principalmente productivo y caracterizado principalmente por la especie *Pinus radiata*, cuyo destino final principal será el aserrado, mientras que el cuartel 2 es productivo- protector y caracterizado principalmente por la especie *Pinus sylvestris*.



Foto 4: Monte Vilarín

El método de ordenación utilizado en la actualidad en el cuartel 1 es el del tramo único (cuartel 1), que tiene una mayor facilidad de gestión y aplicación que el tramo móvil. El tramo único es el método de ordenación más flexible dentro de los de tramos periódicos (tramos permanentes, tramos revisables o tramo único) ya que se excluye la necesidad de formar todos los tramos, formando únicamente el que hay que regenerar de inmediato.

En el cuartel 2, la forma fundamental de la masa es la de monte alto coetáneo o regular y se alcanzará a través de cortas a hecho en dos tiempos por bosquetes, en superficies reducidas, ya que el pino silvestre requiere de cierta sombra para el desarrollo del regenerado. El turno es de 80 años.

La regeneración es artificial por plantación (en cuartel 1), donde el origen del material vegetal utilizado (plántulas) procederá de semilla genéticamente superior, seleccionada de programas de mejora genética y adaptada a las condiciones estacionales de la zona a repoblar.

En el cuartel 2 se pretende obtener la persistencia de la masa por medio de la regeneración natural por semilla. Para ello se realizan claras moderado-fuerte, en concreto se llevan a cabo tres intervenciones de clara para reducir la competencia entre los pies de la masa y obtener una mayor calidad de los productos extraídos, que en total sumen aproximadamente el 30-35% de los pies existentes. También se llevarán a cabo cortas de recuperación o policía, para mantener la masa en buen estado sanitario.

RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA ECOLÓGICO

Los principales resultados obtenidos tras la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de la producción forestal del pino silvestre en la región de Asturias ante los distintos escenarios de cambio climático sugieren una reducción de la producción forestal de entre un 18,50 y el 24,96% en Asturias y hasta un 40,77% en el monte Vilarín en aquellos escenarios de emisiones más pesimistas (rcp85) y unas pérdidas de idoneidad de hábitat que podrían oscilar entre el 46 y 77% para los escenarios menos y más agresivos respectivamente. Ante estos resultados, y desde el punto de vista ecológico de la especie, se exponen a continuación algunas recomendaciones para la gestión en el monte de estudio.

Cambios relativos a la especie o genotipo

Un posible efecto de los cambios asociados al clima en los próximos años es el descenso de la producción forestal del pino silvestre en Asturias y en concreto en el monte Vilarín. Un alto nivel de diversidad confiere a las especies un mayor potencial de adaptación genético (Fady et al., 2015). Por ello, a nivel de especie podría ser necesaria la utilización de ecotipos mejor adaptados a las nuevas condiciones climáticas (p. ej. migración asistida) pudiendo estas medidas impedir el cambio de especie, aunque es posible que unas medidas estructurales adecuadas puedan ser suficientes para mantener como es deseable los ecotipos locales. Unido a las medidas estructurales, y para favorecer el uso de los ecotipos locales se recomienda mantener y fomentar la diversidad genética de la masa en los próximos años, tanto a nivel de

fenotipo como a nivel de genotipo (p. ej. morfotipos que presenten variabilidad en el aspecto de las hojas, porte, foliación, etc.). La regeneración de pino silvestre en el monte Vilarín es principalmente natural, por lo que es particularmente importante conocer el origen de la semilla y asegurarse que los genotipos utilizados son diversos. Los ensayos de procedencia del pino silvestre pueden proporcionar los criterios necesarios para seleccionar los genotipos más adecuados para el área concreta.

Cambios estructurales a nivel de rodal

A nivel de rodal la reducción de la densidad es la medida más habitual para amortiguar los impactos de la sequía (Andrews et al 2020, Bradford & Bell 2016, Giuggiola 2016). Así, la **reducción de la densidad** en rodales de pino silvestre produce una mejora en la eficiencia del uso del agua, lo cual repercute en la reducción de la mortalidad, así como un incremento en el crecimiento individual (Giuggiola 2016). Aunque la densidad media en el monte de estudio (1870 ind/Ha) se encuentra ligeramente por debajo del nivel mediante el cual se obtiene la máxima producción en la región de estudio (Fig. 11c), el tamaño medio de los individuos también se encuentra bastante por debajo de la media de la región (Fig. 11d). Así, se considera que acciones dirigidas a reducir la densidad a nivel de rodal podrían repercutir en un incremento substancial del crecimiento individual y como consecuencia un incremento en producción forestal a nivel de rodal y de monte.

Asimismo, la **reducción de la vegetación arbustiva** puede mejorar la disponibilidad de agua (Giuggiola 2016) contribuyendo de forma simultánea a la mejora de la producción forestal a nivel de rodal.

La heterogeneidad funcional puede mejorar la resistencia y la resiliencia de algunas especies forestales frente a condiciones de menor disponibilidad de agua (Bello et al 2019, Steckel et al. 2020). En concreto, se ha observado que la mezcla del pino silvestre con especies de *Quercus* mejora la resistencia a la sequía (Steckel et al. 2020), debido a un efecto de complementariedad, donde una especie mejora las condiciones ecológicas de la otra, a una reducción en la competencia, dado que cada una de las especies ocupa un nicho ecológico, o a una combinación de ambos procesos. Por ello medidas encaminadas a favorecer la **heterogeneidad funcional** (con más de una especie, incluyendo al menos una conífera y una frondosa) podrían tener un efecto beneficioso en la producción forestal del pino silvestre a escala de rodal.

Además, la **diversidad estructural** permite incrementar la resistencia y la resiliencia frente al incremento de la aridez (Sánchez-Salguero et al. 2013). En sistemas donde se busca una regeneración natural, como es el caso del monte Vilarín con el pino silvestre, el uso de técnicas de aclareo sucesivo uniforme, el uso de densidades más bajas y una extensión del turno de regeneración y de corta permiten mantener la regeneración en muchos sistemas, pero la utilidad del método depende del tipo de producto final. Por otro lado, la regeneración artificial permite hacer rotaciones con el ganado y disminuir el combustible vertical disminuyendo el riesgo de propagación de incendios. El mantenimiento de turnos cortos y rodales de alta densidad es sólo aconsejable si a nivel de paisaje se mantiene la diversificación estructural y funcional para incrementar la resiliencia frente a posibles riesgos como incendios, plagas, sequías y caídas por el viento. Esto requiere unidades de gestión mayores que permitan no ya solo tramos en distintas fases del turno sino heterogeneidad funcional con más de una especie (p.ej. al menos una conífera y una frondosa).

Medidas a nivel de paisaje

A nivel de paisaje, medidas encaminadas a **asegurar la discontinuidad** entre copa y sotobosque, realizando cortas controladas de sotobosque y de las ramas inferiores de los árboles, así como la **introducción del pastoreo** puede ayudar a reducir la severidad de los incendios en el caso de que se produzcan. Como en el caso del monte de Frades, es clave continuar con un sistema de gobernanza que implique a todos los actores locales como ganaderos, cazadores, madereros, valor recreativo local y atractivo para visitantes externos. Aunque debido al cambio climático los incendios forestales es previsible que se hagan más intensos y de mayor tamaño (mega incendios) los factores sociales seguirán siendo un factor determinante. Por ello se recomienda fomentar la interacción y participación de los distintos actores locales y otros agentes de interés involucrados en la gestión del monte, con el fin de adoptar de manera colectiva soluciones a posibles cambios en los elementos relevantes a la adaptación del monte.

6 | Referencias

- AEF, Anuario de Estadística Forestal (2017) Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 102 pp. URL: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/forestal_anuario_2017.aspx
- Allen, C.D., Breshears, D.D. (1998). Drought- induced shift of a forest-woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *Proc Natl Acad Sci U S A* (95) 25: 14839-14842
- Anderegg, W. R. L., Plavcová, L., Anderegg, L. D. L., Hacke, U. G., Berry, J. A., & Field, C. B. (2013). Drought's legacy: multiyear hydraulic deterioration underlies widespread aspen forest die-off and portends increased future risk. *Global Change Biology*, 19(4), 1188–1196.
- Andrews, C. M., D'Amato, A. W., Fraver, S., Palik, B., Battaglia, M. A., & Bradford, J. B. (2020). Low stand density moderates growth declines during hot-droughts in semi-arid forests. *Journal of Applied Ecology*, 57:1089–1102.
- Bello, J., Vallet, P., Perot, T., Balandier, P., Seigner, V., Perret, S., et al., 2019b. How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events? *For. Ecol. Manage.* 432, 436–445
- Bradford, J. B., & Bell, D. M. (2016). A window of opportunity for climate-change adaptation: easing tree mortality by reducing forest basal area. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 1–7.
- Bravo-Oviedo, A., Gallardo-Andrés, C., del Río, M., & Montero, G. (2010). Regional changes of *Pinus pinaster* site index in Spain using a climate-based dominant height model. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(10), 2036–2048.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A. & Stone, C.J. (1984) *Classification and regression trees*. Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, Monterey, CA.
- Ence Cátedra, 2015. Informe Impacto Forestal de Ence en Galicia. Cátedra Ence, Universidad de Vigo, Vigo, España. 126pp.
- FAO (2011) *La contribución del sector forestal a las economías nacionales 1990-2011*. Ed. A. Lebedys, A., Li., Y. Documento de trabajo sobre finanzas forestales FSFM/ACC/09. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia. 172 pp.
- Giuggiola, A. 2016. Doctoral Thesis: Impact of forest management on the drought resistance of dry pine forests. ETH Zürich, Zürich. 215pp.

Hastie, T.J. & Tibshirani, R. (1990) Generalized additive models. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL.

IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Leal S, Emaus D, Grabner M, Wimmer R, Cherubini P (2008) Tree rings of *Pinus nigra* from the Vienna basin region (Austria) show evidence of change in climatic sensitivity in the late 20th century. *Can J For Res* 38:744–759

Matías, L., & Jump, A. S. (2014). Asymmetric changes of growth and reproductive investment herald altitudinal and latitudinal range shifts of two woody species. *Global Change Biology*, 21, 882-896.

Matías, L., Linares, J. C., Sánchez-Miranda, Á., & Jump, A. S. (2017). Contrasting growth forecasts across the geographical range of Scots pine due to altitudinal and latitudinal differences in climatic sensitivity. *Global Change Biology*, 23(10),

McCullagh, P. & Nelder, J.A. (1989) Generalized linear models. Chapman and Hall, London.
Rozas, V., Zas, R., & García-González, I. (2011). Contrasting effects of water availability on *Pinus pinaster* radial growth near the transition between the Atlantic and Mediterranean biogeographical regions in NW Spain. *European Journal of Forest Research*, 130(6), 959–970.

R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria <http://www.R-project.org/>.

Ruiz-Benito, P., Ratcliffe, S., Jump, A.S., Madrigal-González, J., Gerald, K., Lehtonen, A., Dahlgren, J., Kattge, J., Valle, C. (2017) Functional diversity underlies demographic responses to environmental variation in European forests. *Global Ecology and Biogeography* 26:128–141

Sánchez-Salguero, R., Camarero, J. J., Dobbertin, M., Fernández-Cancio, Á., Vilà-Cabrera, A., Manzanedo, R. D., ... Navarro-Cerrillo, R. M. (2013). Contrasting vulnerability and resilience to drought-induced decline of densely planted vs. natural rear-edge *Pinus nigra* forests. *Forest Ecology and Management*, 310, 956–967.

Sánchez-Salguero, R., Camarero, J. J., Hevia, A., Madrigal-González, J., Linares, J. C., Ballesteros-Canovas, J. A., ... Rigling, A. (2015). What drives growth of Scots pine in continental Mediterranean climates: Drought, low temperatures or both? *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 151–162.

Serra-Varela, M. J., Alía, R., Pórtoles, J., Gonzalo, J., Soliño, M., Grivet, D., & Raposo, R. (2017). Incorporating exposure to pitch canker disease to support management decisions of *Pinus pinaster* Ait. in the face of climate change. *PLOS ONE*, 12(2), e0171549.

Steckel, M. , del Río, M., Heym , M., Aldea, J., Bielak, K., Brazaitis, G., Černý , J., Coll, L., Collet, C., Ehbrecht, M., Jansons, A., Nothdurft, A. , Pach, M., Pardos, M., Ponette, Q., Reventlow, D., Sitko, R., Svoboda, M., Vallet, P., Wolff, B., Pretzsch, H. (2020). Species mixing reduces drought susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) – Site water supply and fertility modify the mixing effect. *Forest Ecology and Management*, 461: 117908.

Variables climáticas examinadas para los modelos de idoneidad de hábitat

Para seleccionar aquellas variables climáticas que van a ser más determinantes en la distribución de cada una de las especies de estudio, realizamos un análisis exploratorio donde comparamos el espacio ambiental ocupado por las variables climáticas de estudio y ocupado por la especie en concreto (Figura 9,10 a). Además, realizamos un análisis de componentes principales (PCA) en el que observamos cómo de correlacionadas están todas las variables climáticas utilizadas (Figura 9,10 b).

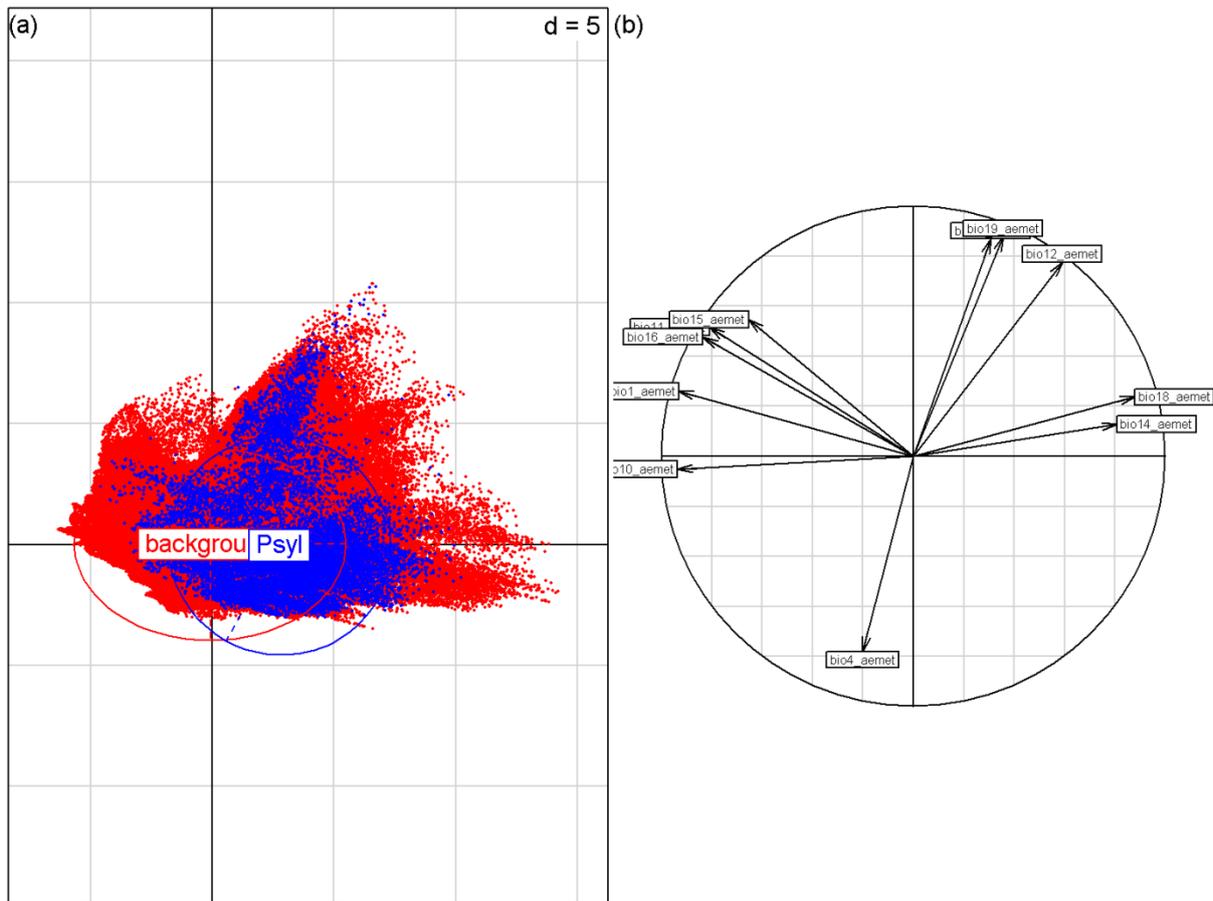


Figura S1.a) Espacio ambiental donde se distribuye la especie *Pinus sylvestris* (azul) y las variables climáticas (rojo). **b)** PCA de las variables ambientales

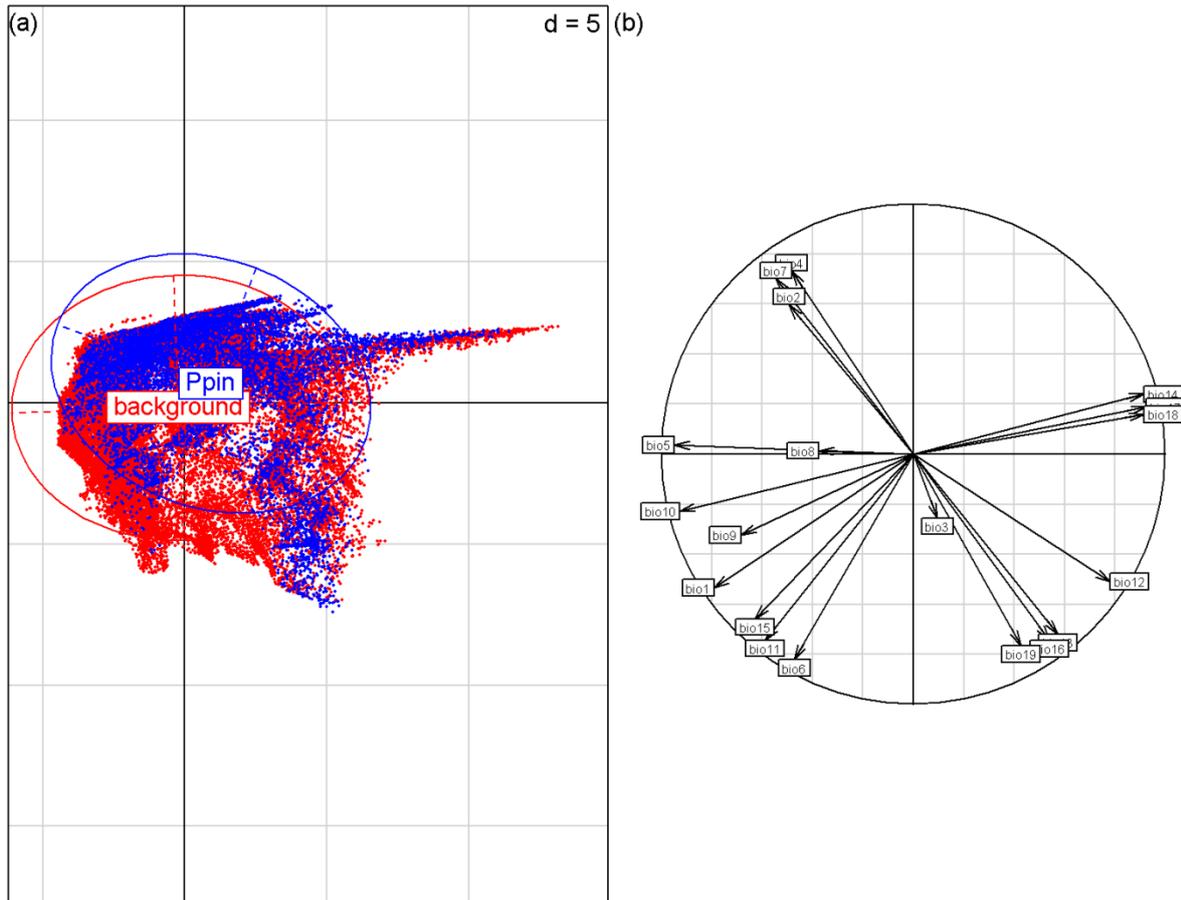


Figura S2.a) Espacio ambiental donde se distribuye la especie *Pinus pinaster* (azul) y las variables climáticas (rojo). **b)** PCA de las variables ambientales

Una vez exploramos el espacio ambiental, hacemos una selección de las variables climáticas con las que vamos a trabajar. En concreto se han seleccionado las variables especificadas en la tabla 1.

Tabla1. Descripción de las variables climáticas utilizadas en los modelos de distribución de especies

Variable	Description
BIO1	Annual Mean Temperature
BIO4	Temperature Seasonality (standard deviation *100)
BIO12	Annual Precipitation
BIO14	Precipitation of Driest Month
BIO15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
BIO19	Precipitation of Coldest Quarter

Para calibrar los modelos de idoneidad de hábitat utilizamos cuatro algoritmos estadísticos. Specifically, we used general linear models (GLMs; McCullagh & Nelder, 1989), generalized additive models (GAMs; Hastie & Tibshirani, 1990), random forest (RF; (Breiman 2001)) and classification tree analysis (CTA; Breiman et al., 1984). All models were processed using the package ‘biomod2’ (Thuiller et al. 2009) in R 3.3.1 (R Development Core Team 2011). The performance of the model was assessed by means of the true skill statistic (TSS) and the area under the receiver operating characteristic curve (ROC). We averaged the predictions from the five individual algorithms to create an ensemble model (e.g. refs). We evaluated the model on 20% of the set-aside evaluation records.

Los cuatro algoritmos estadísticos utilizados (CTA, GAM, GLM y RF) tuvieron una elevada capacidad predictiva, como indican las métricas de ROC y TSS con valores siempre superiores a 0,8 en el caso del pino silvestre (Figura 11a), y superiores a 0,7 para el pino pinaster (Figura 11b).

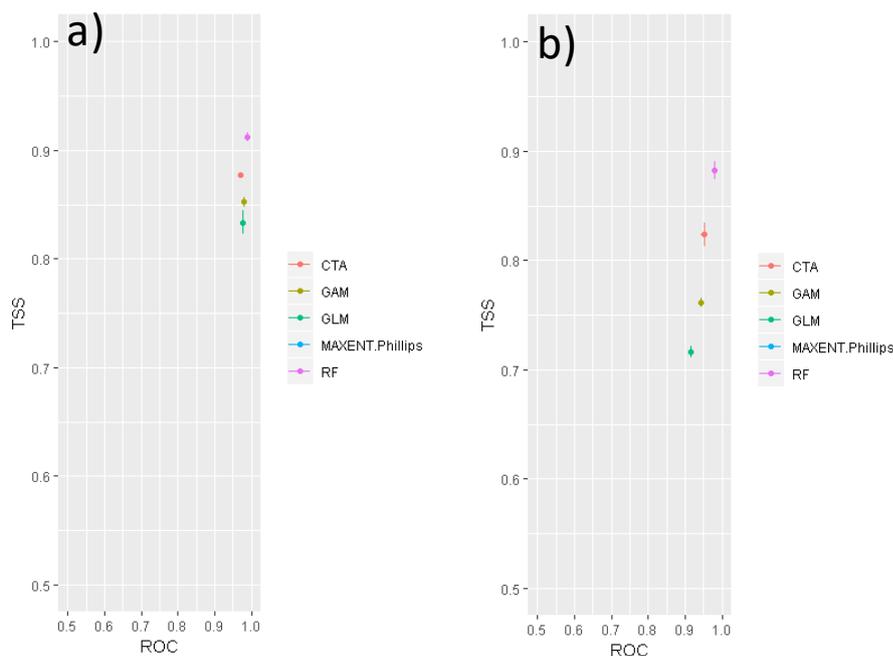


Figura 11. Evaluación del desarrollo de los modelos CTA, GAM, GLM y RF usando las métricas TSS y ROC para las especies de a) *Pinus sylvestris* y b) *Pinus pinaster*.

“Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto”