

PROYECCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECUESTRO Y STOCK DE CARBONO EN LOS BOSQUES ESPAÑOLES

Abril 2023

Miquel De Cáceres Ainsa, Roberto Molowny Horas, Adriana Tovar Rodriguez, Mireia Banqué Casanovas,
Jordi Vayreda Duran, Enrique Doblas Miranda

CREAF, 08193 Cerdanyola del Vallès



CREAF



EXCEL·LÈNCIA
SEVERO
OCHOA

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	3
2. OBJETIVOS DEL INFORME.....	5
3. METODOLOGÍA.....	6
3.1 Descripción del modelo de dinámica forestal.....	6
3.2 Datos empleados.....	7
3.3 Evaluación de servicios ecosistémicos forestales.....	9
4. RESULTADOS.....	12
4.1 Variables estructurales.....	12
4.2 Materias primas: madera estructural.....	19
4.3 Materias primas: leñas.....	26
4.4 Regulación climática.....	33
5. GESTIÓN PARA LA ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN.....	40
5.1 Objetivos y metodología de análisis.....	41
5.2 Análisis y síntesis de los resultados.....	46
6. DISCUSIÓN.....	48
6.1 Sumidero de carbono en los bosques españoles y efectos del cambio climático.....	48
6.2 Reflexiones sobre el modelado de la gestión forestal.....	49
7. CONCLUSIONES.....	50
8. REFERENCIAS.....	51
ANEXO A: TEORÍA DEL FPM.....	57
ANEXO B: GLOSARIO.....	62

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los bosques son ecosistemas esenciales, tanto por su extensión – ocupan el 31% de la biosfera terrestre – como por su papel como componente y soporte para la biodiversidad y los múltiples servicios ecosistémicos que proveen a las sociedades humanas (provisión de materias primas, servicios de regulación, servicios culturales, etc.). En concreto, los bosques tienen un papel clave en la **regulación del ciclo del carbono** a escala global, dada su capacidad de actuar como sumidero o fuente de carbono, derivada de su alta capacidad de almacenar carbono en troncos, raíces y suelo. El clima es uno de los factores determinantes en la variación de la provisión de servicios ecosistémicos forestales, debido a su impacto en el balance de agua y carbono del bosque, así como en los procesos demográficos que determinan su dinámica estructural y composicional. Los **impactos del cambio climático** recientemente observados en los patrones de decaimiento y mortalidad forestales, y las previsiones de futuros impactos en forma de eventos cada vez más extremos, están poniendo en duda la capacidad futura de los bosques de mantener sus funciones frente a estas perturbaciones. (Gonzalez-Diaz et al., 2020) entre las cuales el mantenimiento de la capacidad de sumidero de carbono.

La **gestión forestal** – entendida como una perturbación controlada, orientada a preservar el funcionamiento del bosque y la provisión de servicios asociados – puede ser un **factor clave** para asegurar la adaptación y mitigación de los bosques al cambio mediante la promoción de una función de sumidero (Ruiz Peinado et al., 2017; González Díaz et al., 2020; MITECO, 2022). Eso es así porque los componentes más importantes en la dinámica del carbono están directamente relacionados con la estructura del bosque (Gonzalez-Diaz et al., 2020).

El contexto histórico reciente de los bosques de la Península Ibérica, como el de la mayor parte de regiones del lado septentrional del Mediterráneo, está marcado por un **aumento de la superficie arbolada** derivada del abandono de prácticas agrícolas y de gestión forestal en muchas áreas durante la segunda mitad del s. XX (Bravo et al., 2017; Vadell et al., 2022). Dichos cambios en el uso del suelo y prácticas de aprovechamiento han provocado que la biomasa de los bosques españoles haya aumentado en las últimas décadas, por densificación y crecimiento de pies jóvenes, contribuyendo a una función de sumidero importante (Vayreda et al., 2012; Gonzalez-Diaz et al., 2020). Dicho incremento se ha visto, en parte, reducido por la acción de incendios forestales, que han aumentado su peligrosidad debido en parte a la mayor disponibilidad de combustible y su continuidad, así como por el impacto de plagas forestales (Serrada et al., 2011; Vilà -Cabrerá et al., 2018).

Las proyecciones de cambio climático indican un progresivo incremento de temperatura media durante todo el s. XXI, más o menos acusado según el escenario considerado, y una probable disminución de las precipitaciones, aumentando la estacionalidad y la frecuencia de fenómenos extremos como lluvias torrenciales, olas de calor y sequías intensas. Aunque muchas especies forestales, especialmente en la eco-región mediterránea, disponen de adaptaciones para hacer frente a periodos prolongados de déficit de agua, los cambios climáticos esperados podrían tener importantes efectos tanto en la reducción del crecimiento como en el incremento de las tasas de mortalidad y en la reducción de la capacidad de regeneración natural de algunas especies (Serrada et al., 2011; Vayreda et al., 2012). Por lo tanto, es importante disponer de **herramientas de simulación** que permitan **evaluar los posibles impactos** del cambio climático esperado bajo distintos escenarios socio-económicos

sobre la dinámica de los ecosistemas forestales españoles, así como sobre su capacidad de proveer bienes y servicios. En concreto, se hace necesario evaluar los cambios futuros en los stocks de carbono de los bosques y la velocidad de secuestro o emisión, o sea su función de sumidero o fuente.

2. OBJETIVOS DEL INFORME

El objetivo principal del presente trabajo es el de **proyectar los cambios futuros en el stock y el sumidero de carbono de los bosques españoles** hasta finales del siglo XXI bajo distintos escenarios climáticos. En otras palabras, se pretende evaluar cuánto carbono serán capaces de secuestrar y con qué velocidad se llevará a cabo dicha acumulación. La consideración de distintos **escenarios climáticos** (uno bajo un clima constante y dos incluyendo cambio climático) nos permite evaluar el potencial impacto del cambio climático en el balance de carbono de los bosques, es decir, en su función sumidero o fuente. La evaluación del servicio ecosistémico de regulación climática se complementa con evaluaciones de los cambios en el stock de madera y leñas, así como en las tasas de acumulación de las mismas.

Para la proyección de los cambios en estructura y composición de los bosques se emplea un **modelo de dinámica forestal** basado en el Inventario Forestal Nacional (IFN). Aun siendo importante para la proyección de la dinámica forestal futura, las simulaciones llevadas a cabo en el presente estudio **no incluyen los efectos de la gestión forestal**, que se deberían representar mediante la consideración de distintos escenarios de gestión, definidos en función de distintos contextos socioeconómicos. La inclusión de la gestión forestal será objeto de futuros trabajos. Sin embargo, con el fin de resaltar su importancia, el presente informe incluye una revisión de las prácticas de gestión recomendadas para promover la mitigación y/o adaptación de los bosques españoles al cambio climático, así como una indicación de cómo representar dichas prácticas en los modelos de simulación.

3. METODOLOGÍA

Los **inventarios forestales nacionales** son una buena fuente de datos para el desarrollo y aplicación de sistemas de proyección de la dinámica forestal, habiéndose desarrollado de manera análoga en distintos países (Hynynen 2002; Dixon 2013; Trasobares et al. 2021). Para evaluar los cambios futuros en la provisión de servicios ecosistémicos forestales, en este trabajo se empleó un modelo de dinámica forestal, desarrollado a partir del Inventario Forestal Nacional (IFN), para proyectar la dinámica futura de los bosques peninsulares bajo distintos escenarios climáticos. Posteriormente se emplearon las series obtenidas para calcular la provisión de servicios ecosistémicos forestales bajo los escenarios climáticos considerados.

3.1 Descripción del modelo de dinámica forestal

El modelo numérico de dinámica forestal empleado (*Forest Projection Model* o “FPM”) simula cómo va a crecer el bosque a corto y medio plazo a partir de parámetros climáticos y de estructura del rodal. La formulación básica del modelo de dinámica forestal utilizado en las simulaciones sigue la desarrollada por Easterling et al. (2000) en su Modelo Integral de Proyección (*Integral Projection Model* o “IPM” en la literatura científica en inglés), y consiste en determinar, para cada especie, el número de individuos N en un tiempo futuro $t + \Delta$, a partir del número de individuos en un tiempo anterior t , de la siguiente manera:

(Ecuación 1)

$$N(y, t + \Delta) = N_{\text{Adultos}}(y, t) + N_{\text{Fecun}}(y, t)$$

De esta manera, el número de individuos en un tiempo futuro $t + \Delta$ se divide en dos contribuciones: la primera, N_{Adultos} , se debe a la dinámica de los individuos adultos ya existentes, mientras que la segunda, N_{Fecun} , corresponde a la incorporación de nuevos individuos a partir de semillas dispersadas por árboles adultos. Cada término se puede expresar de manera general como sigue:

(Ecuación 2)

$$N_{\text{Adultos}} = \int N(x, t) \cdot S(x, \dots) \cdot G(x, y, \dots) \cdot dx$$
$$N_{\text{Fecun}} = \int N(x, t) \cdot F(x, y, \dots) \cdot dx$$

Por tanto, el número de individuos $N(x, t)$ en el tiempo t y con diámetro comprendido dentro del intervalo infinitesimal $(x, x + dx)$ se multiplica por varias funciones y se integra para todos los valores de x , para cada valor del diámetro futuro y . En estas ecuaciones, las variables x e y representan el diámetro del árbol a 1,35m de altura en un tiempo t y $t + \Delta$, respectivamente, asumiendo $\Delta = 10$ años en nuestras simulaciones. En las Ecuaciones 1 y 2, cualquier dependencia funcional de conjuntos de variables medioambientales, de estructura de la parcela, etc., se ha incluido de manera simbólica con una elipsis “...”, pero esta elipsis se omitirá a partir de ahora por razones de claridad. Al contrario que en los modelos matriciales de dinámica forestal, en los IPM la población de individuos, definida por una variable como, por ejemplo, el diámetro, es continua, no discreta. Esta estrategia permite evitar la pérdida de información que conlleva la imposición de clases diametrales arbitrarias, dentro de cada una

de las cuales se asume que los árboles tienen el mismo diámetro, y por eso es más apropiada para la predicción de la dinámica forestal.

En FPM hay tres funciones, $S(x)$, $G(x, y)$ y $F(x, y)$, que representan los rasgos vitales de supervivencia, crecimiento y fecundidad de los árboles de una especie determinada. La forma funcional exacta de estos rasgos se asume y se parametriza estadísticamente (Anexo A) a partir de datos experimentales de los Inventarios Forestales Nacionales (IFN) 2 y 3. Igualmente, debido a la metodología de muestreo en campo de los IFN, la modelización de los pies menores (diámetro $x, y \leq 7,5$ cm) se ha llevado a cabo mediante una regresión de Poisson cero-inflada.

La modelización de las funciones de probabilidad de supervivencia y crecimiento, respectivamente $S(x)$ y $G(x, y)$, se llevaron a cabo asumiendo una función logística para la primera y una distribución log-normal para la segunda. En cuanto a $F(x, y)$, se decidió reformularla para separarla en dos funciones: por una parte, el número medio de pies menores como una función de Poisson cero-inflada, y por otra el número y distribución de diámetros de los árboles incorporados ($x \geq 7,5$ cm) como el producto de una distribución exponencial truncada con una función de Poisson. Todas estas funciones se obtuvieron a partir de los datos de los inventarios IFN2 y IFN3 y de las variables climáticas relevantes. Véase Anexo A para una descripción más detallada.

3.2 Datos empleados

Inventarios Forestales Nacionales

Las parcelas del Inventario Forestal Nacional están situadas en los nodos de una malla de 1km a lo largo del territorio. El muestreo de campo incluye la identificación y medida del diámetro y altura árboles en cuatro subparcelas concéntricas. Los datos empleados en la calibración del modelo de dinámica forestal corresponden al crecimiento, mortalidad e incorporación de árboles en parcelas comunes a la segunda y tercera edición del Inventario Forestal Nacional (IFN2 e IFN3) para el conjunto de la España peninsular (por lo tanto, se excluyen las Islas Baleares y Canarias). Se calibró el modelo independientemente para cada una de las especies arbóreas principales. Sin embargo, para las especies menos frecuentes la cantidad de datos observados no es suficiente para obtener modelos robustos, con lo que es necesario agrupar dichas especies en grupos funcionales. La tabla 3.3.2 muestra las especies y grupos funcionales considerados en el modelo de dinámica forestal, así como los códigos de especie del inventario forestal nacional que representan.

Para llevar a cabo las proyecciones de dinámica forestal se tomó como punto de partida la estructura y composición de los bosques españoles peninsulares recogida en el Tercer Inventario Forestal Nacional (52,375 parcelas), que corresponde aproximadamente al año 2000. Se seleccionaron parcelas que no mostraban señales de haber sido gestionadas recientemente ni de haber sufrido daños debido a incendios. Esta selección incluye tanto bosques como plantaciones, con un mínimo de fracción de cabida cubierta arbórea. Es importante resaltar que el FPM no permite incluir las especies de matorral en las simulaciones. La no inclusión de la dinámica de las especies de matorral del sotobosque conlleva asumir que los cambios de abundancia en dichas especies no son relevantes para los servicios ecosistémicos considerados.

Datos climáticos

Como variables climáticas empleadas en la determinación de las diferentes funciones del modelo, tanto en su calibración como en las diferentes proyecciones, hemos usado la precipitación acumulada anual P y la temperatura media anual T de cada localización, en promedios decadales (dado el paso temporal de 10 años del modelo), así como las correspondientes anomalías de precipitación A_P y temperatura A_T calculadas como sigue:

(Ecuación 3)

$$A_P = \frac{P - P_{ref}}{P_{ref}}$$
$$A_T = T - T_{ref}$$

Las variables P_{ref} y T_{ref} representan, respectivamente, la precipitación total y la temperatura media anuales del periodo de referencia, que en nuestro caso corresponde al periodo histórico 1971-2000. Aunque otras variables (p. ej. precipitación durante el periodo vegetativo) podrían ser más relevantes, según qué especie, para describir los procesos empleados en las simulaciones de dinámica forestal hemos optado por los valores anuales por simplicidad.

Para los procesos de calibración del modelo se descargaron los datos del Grupo de Meteorología de Santander (Herrera et al. 2015). Se trata de datos diarios meteorológicos para toda la península ibérica (España y Portugal) calculados a partir de aproximadamente 3000 estaciones de precipitación y 250 de temperatura. La obtención de mapas continuos a nivel peninsular a partir de esas mallas de datos se llevó a cabo mediante técnicas de interpolación numérica.

Un primer conjunto de simulaciones se realizó asumiendo un clima constante, en el que las variables predictoras climáticas tenían los mismos valores empleados para la calibración. Para llevar a cabo las proyecciones de la dinámica forestal bajo escenarios de cambio climático se obtuvieron datos climáticos de la Climate Data Store de la base de datos Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), correspondientes a los escenarios climáticos RCP 4.5 (cambio climático moderado) y RCP 8.5 (cambio climático severo). En particular, se descargaron datos de la base “Temperature and precipitation climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from European climate projections” (Berg et al. 2021) para la temperatura y precipitación. Se trata de datos diarios corregidos de sesgo calculados a partir de un conjunto de modelos regionales climáticos para toda Europa. Tanto en el caso de la calibración como en el de las proyecciones, los datos diarios se agregaron a nivel anual para obtener, posteriormente, las variables promediadas de manera decadal de nuestras simulaciones.

Fuente	Res. espacial (km)	Res. temporal	Periodo
SMG	10 × 10	Diaria	1971-2000
CDS (histórico)	10 × 10	Diaria	1971-2005
CDS (RCP4.5 o RCP 8.5)	10 × 10	Diaria	2006-2100

Tabla 3.2.1. Descripción de los datos climáticos de calibración y proyección. La resolución espacial es aproximada. CDS – *Copernicus Climate Data Store*; SMG – *Santander Meteorology Group*.

3.3 Evaluación de servicios ecosistémicos forestales

Los servicios ecosistémicos forestales (SEF) de materias primas y regulación climática se evaluaron, bajo los distintos escenarios climáticos y para distintos periodos, mediante el cálculo de cuatro indicadores biofísicos. En la tabla 3.3.1 se muestran los SEF, sus indicadores, las unidades de cada uno y los años/periodos considerados. En todos los casos, se trata de indicadores intensivos, es decir, promedios por unidad de superficie forestal (hectárea). Para escalar los resultados a indicadores extensivos sería necesario multiplicar los indicadores por la superficie forestal de la región considerada (p. ej., provincias, comunidades autónomas o el conjunto de la España peninsular). Un escalado más fino de los indicadores se puede realizar empleando los estratos del IFN, que permiten saber el área forestal representada por cada parcela.

SERVICIO ECOSISTÉMICO	INDICADOR	UNIDADES	AÑOS/PERIODOS
Materias primas	Reserva de leñas y madera	m ³ /ha	2000, 2030, 2060, 2090
	Oferta de leñas y maderas	m ³ /ha/año	2000-2030, 2030-2060, 2060-2090
Regulación climática	Reserva de carbono	t CO ₂ /ha	2000, 2030, 2060, 2090
	Sumidero de carbono	t CO ₂ /ha/año	2000-2030, 2030-2060, 2060-2090

Tabla 3.3.1. Servicios ecosistémicos forestales, indicadores considerados, unidades y años/periodos de evaluación.

A continuación, detallamos el proceso de cálculo de cada SEF, que se realiza partiendo de la secuencia de cambios estructurales decadales derivados del modelo de simulación forestal.

Stock de madera estructural y leñas

Para evaluar el stock de materias primas se han utilizado los indicadores de **stock de madera estructural (m³/ha)** y **stock de leñas (m³/ha)**. El stock de madera estructural corresponde al volumen del tronco con corteza de los árboles de diámetro suficiente para destinarse a usos estructurales tales como la construcción de muebles o edificios. Más específicamente, se trata del volumen de madera de los árboles vivos con diámetro mayor a 22,5 cm de todas las especies – con excepción de la encina, alcornoques y otras esclerófilas –. El stock de leñas se mide utilizando el volumen del tronco con corteza de encinas, alcornoques y otras esclerófilas (de cualquier tamaño) y el volumen del tronco con corteza de los árboles de las otras especies con diámetros menores a 22,5 cm. Así pues, la suma del stock de madera estructural y del stock de leñas proporcionaría una estimación el volumen de madera total del bosque. Para el cálculo de volúmenes se emplearon las ecuaciones alométricas provenientes del tercer Inventario Forestal Nacional, específicas para cada provincia y especie, siguiendo la correspondencia indicada en la Tabla 3.3.2. Para poder aplicarse, dichas ecuaciones requieren

una estimación de la altura del árbol, además de su diámetro. Dado que el modelo de dinámica forestal solamente predice los cambios en diámetro, se emplearon ecuaciones alométricas para estimar las alturas a partir de los diámetros predichos en cada paso de la simulación. La correspondencia entre las especies del modelo y las especies de las alometrías de altura se indican también en la Tabla 3.3.2.

Oferta de madera estructural y leñas

Para la oferta de materias primas se utilizaron los indicadores de **oferta de madera estructural ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$)** y **oferta de leñas ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$)**. En cada parcela simulada se calculó la tasa de crecimiento anual como la diferencia en el volumen en pie entre el inicio y fin del periodo considerado, dividida por el número de años transcurrido. Por lo tanto, los indicadores de oferta de madera estructural y leñas hacen referencia a la tasa de cambio anual en el stock de madera correspondiente.

Stock de carbono

El indicador de **stock de carbono ($\text{t CO}_2/\text{ha}$)** hace referencia a la cantidad de carbono acumulado en la biomasa de los árboles vivos del bosque, incluyendo tanto la parte aérea (ramas, tronco y hojas) como la subterránea (raíces gruesas), pero excluyendo el carbono existente en la materia orgánica de la matriz del suelo. El cálculo de la biomasa se realizó empleando las ecuaciones alométricas desarrolladas para distintas especies, presentadas en distintos trabajos (Ruiz-Peinado et al. 2011, 2012; Diéguez-Aranda et al. 2009; Ibáñez et al. 2009). La especie de la ecuación de biomasa específica empleada para cada especie/grupo del modelo se indica en la tabla 3.3.2. Como en el caso del volumen de madera, las ecuaciones de biomasa requieren estimaciones de diámetro y altura de los árboles, con lo que también fue necesario el uso de alometrías de altura.

Sumidero de carbono

Para evaluar el indicador de **sumidero de carbono ($\text{t CO}_2/\text{ha}/\text{año}$)** para un periodo dado, se calculó la diferencia en el stock de carbono entre el inicio y el fin del periodo, dividida por el número de años transcurridos, de manera análoga al cálculo de la oferta de madera estructural y leñas. El indicador de sumidero de carbono es una expresión de la tasa o ritmo con la que los bosques capturan CO_2 y lo almacenan en troncos y raíces.

Especie/grupo en el modelo	Código(s) IFN	Alometría de altura	Alometría de biomasa	Alometría de volumen
Abies alba	031	Abies alba	Abies alba	Abies alba
Otros caducifolios	(1)	Fraxinus excelsior	Fraxinus angustifolia	Fraxinus spp.
Castanea sativa	072	Castanea sativa	Castanea sativa	Castanea sativa
Otras coníferas	(2)	Juniperus communis	Juniperus communis	Juniperus communis
Esclerófilas	(3)	Phillyrea latifolia	Phillyrea latifolia	Phillyrea latifolia
Fagus sylvatica	071	Fagus sylvatica	Fagus sylvatica	Fagus sylvatica
Juniperus thurifera	038	Juniperus phoenicea	Juniperus phoenicea	J. phoenicea, J. sabina
Larix spp.	035	Larix decidua	Larix spp.	Larix spp.
Pinus halepensis	024	Pinus halepensis	Pinus halepensis	Pinus halepensis
Pinus nigra	025	Pinus nigra	Pinus nigra	Pinus nigra
Pinus pinaster	026	Pinus pinaster	Pinus pinaster	Pinus pinaster
Pinus pinea	023	Pinus pinea	Pinus pinea	Pinus pinea
Pinus sylvestris	021	Pinus sylvestris	Pinus sylvestris	Pinus sylvestris
Pinus uncinata	022	Pinus uncinata	Pinus uncinata	Pinus uncinata
Plantaciones	(4)	Populus nigra	Populus alba	Populus alba
Quercus faginea	044	Quercus faginea	Quercus faginea	Quercus faginea
Quercus ilex	045	Quercus ilex	Quercus ilex ssp. ballota	Quercus ilex
Quercus petraea/robur	041, 042	Quercus petraea	Quercus petraea	Quercus petraea
Quercus pyrenaica	043, 243	Quercus pyrenaica	Quercus pyrenaica	Q. pyrenaica, Q. pubescens
Quercus suber	046	Quercus suber	Quercus suber	Quercus suber
Ribera	357, 092, 059	Alnus glutinosa	Alnus glutinosa	Alnus glutinosa

Tabla 3.3.2. Equivalencias entre las especies/grupos considerados en el modelo de simulación forestal y la identidad de especie en el Inventario Forestal Nacional y en las ecuaciones alométricas empleadas posteriormente para el cálculo de alturas, volúmenes con corteza y biomasa. **Códigos adicionales** - (1) Otros caducifolios: 273, 055, 073, 215, 054, 076, 255, 057, 476, 074, 047, 095, 276, 052, 278, 056, 378, 395, 373, 657, 048, 075, 576, 075, 016, 079, 099, 077, 078, 012, 051, 015, 578, 207, 084, 257, 097, 307, 377, 299, 013, 256, 007, 757, 238, 277, 676, 478, 469, 355, 495, 857, 295, 356, 376, 009, 011, 282, 297, 392, 399, 415, 595, 002, 049, 457, 499; (2) Otras coníferas: 237, 037, 039, 032, 036, 032, 014, 033, 029, 337; (3) Esclerófilas: 068, 066, 065, 008, 067, 083, 093, 082, 294, 094, 091, 004, 003, 053, 069, 086, 005, 006; (4) Plantaciones: 061, 028, 062, 258, 034, 018, 064, 364, 236, 017, 063, 235, 264, 317, 436, 217, 336, 319.

4. RESULTADOS

Las siguientes secciones muestran los resultados del ejercicio de simulación en cuanto al cambio de variables estructurales de los bosques (densidad y área basimétrica) así como en cuanto a la provisión de los cuatro indicadores de SEF considerados. Los resultados se presentan focalizándonos en tres periodos (inicio, mediados y finales) de s. XXI. Para cada variable estructural o indicador de servicio, en primer lugar, se presenta una tabla resumen para toda la España peninsular. Esta contiene los valores absolutos de la variable estructural o indicador de servicio por escenario climático (clima constante, RCP4.5 y RCP8.5) y periodo, así como el porcentaje de variación de los escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5) respecto al escenario de clima constante. A continuación, se muestra la distribución geográfica de la variable estudiada y diagramas de barras con los promedios por comunidades autónomas y especies principales (o agrupaciones de especies).

4.1 Variables estructurales

En todos los escenarios considerados, el modelo predice **un aumento continuado de la densidad** (número de pies) y **área basimétrica** (Tabla 4.1.1.a). En cuanto a densidad, ésta se triplica entre 2000 y 2090 para el escenario de clima constante. En cuanto a área basimétrica, esta también aumenta de manera sostenida a lo largo del siglo, pasando de un promedio de 12 m²/ha a 62 m²/ha entre el inicio y el fin de siglo. Las diferencias entre escenarios en cuanto a densidad o área basimétrica implican una ralentización de la densificación y crecimiento en un contexto de cambio climático, sobre todo durante la segunda mitad de siglo, llegando incluso a una disminución de la densidad de pies vivos para final de siglo bajo el escenario más severo. Si comparamos el escenario de cambio climático severo con el de clima constante, observamos un 43% menos de densidad y un 22% menos de área basimétrica para finales de s. XXI (Tabla 4.1.1.b).

(a) Escenario climático	Densidad (ind./ha)				Área basimétrica (m ² /ha)			
	2000	2030	2060	2090	2000	2030	2060	2090
Clima constante	352	648	918	1031	12	29	47	62
RCP 4.5	352	624	837	945	12	28	45	58
RCP 8.5	352	509	599	586	12	26	39	49
(b) Escenario climático	Densidad (% clima constante)				Área basimétrica (% c. c.)			
	2000	2030	2060	2090	2000	2030	2060	2090
RCP 4.5	0,0	-3,7	-8,8	-8,3	0,0	-2,1	-5,1	-6,0
RCP 8.5	0,0	-21,5	-34,7	-43,2	0,0	-11,8	-18,0	-21,5

Tabla 4.1.1. (a) Promedio peninsular de densidad de árboles y área basimétrica durante los años considerados. (b) Porcentaje de variación de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a los valores del escenario de clima constante para el mismo periodo/año.

Densidad

Los mayores incrementos en densidad se producen para la encina y otras especies esclerófilas, aunque también son notables los incrementos de densidad de otras especies (Fig. 4.1.2). En este sentido, el modelo puede estar sobreestimando los incrementos de densidad en dehesas, dado que no se limita la incorporación de nuevos árboles. En cuanto a la distribución geográfica (Fig. 4.1.1 y 4.1.3), los incrementos más notables se dan de forma generalizada en todas las comunidades, aunque destaca el caso de Cataluña.

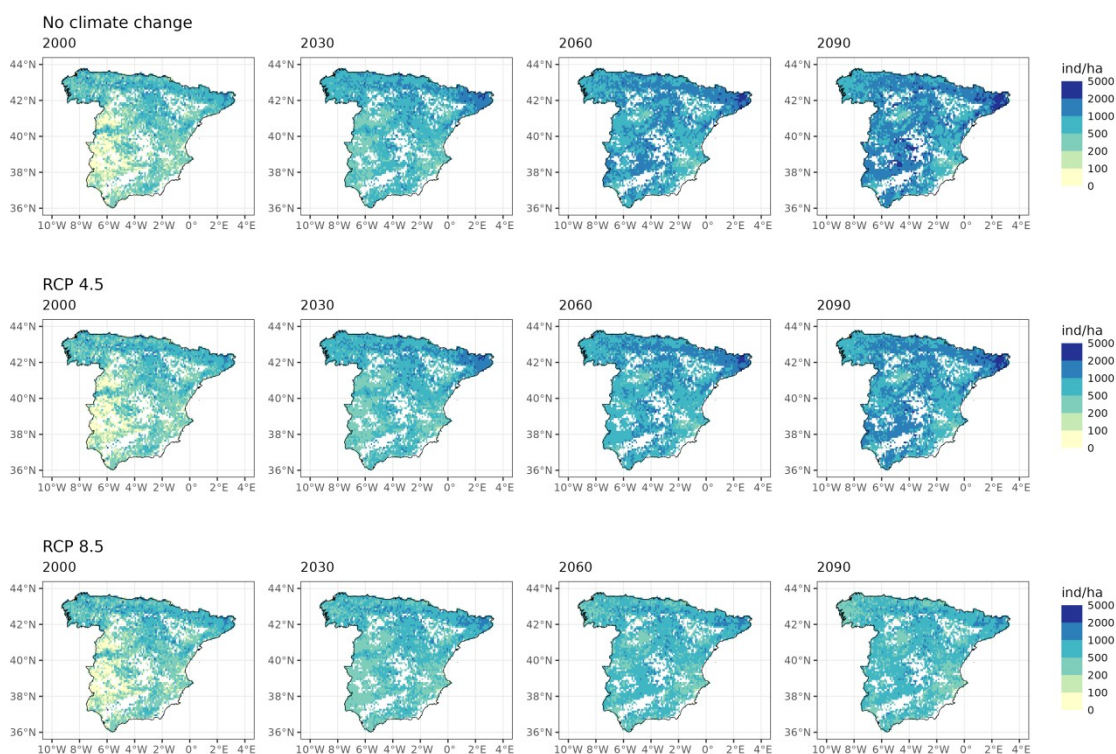


Fig. 4.1.1. Distribución geográfica de la densidad de árboles (individuos por hectárea) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

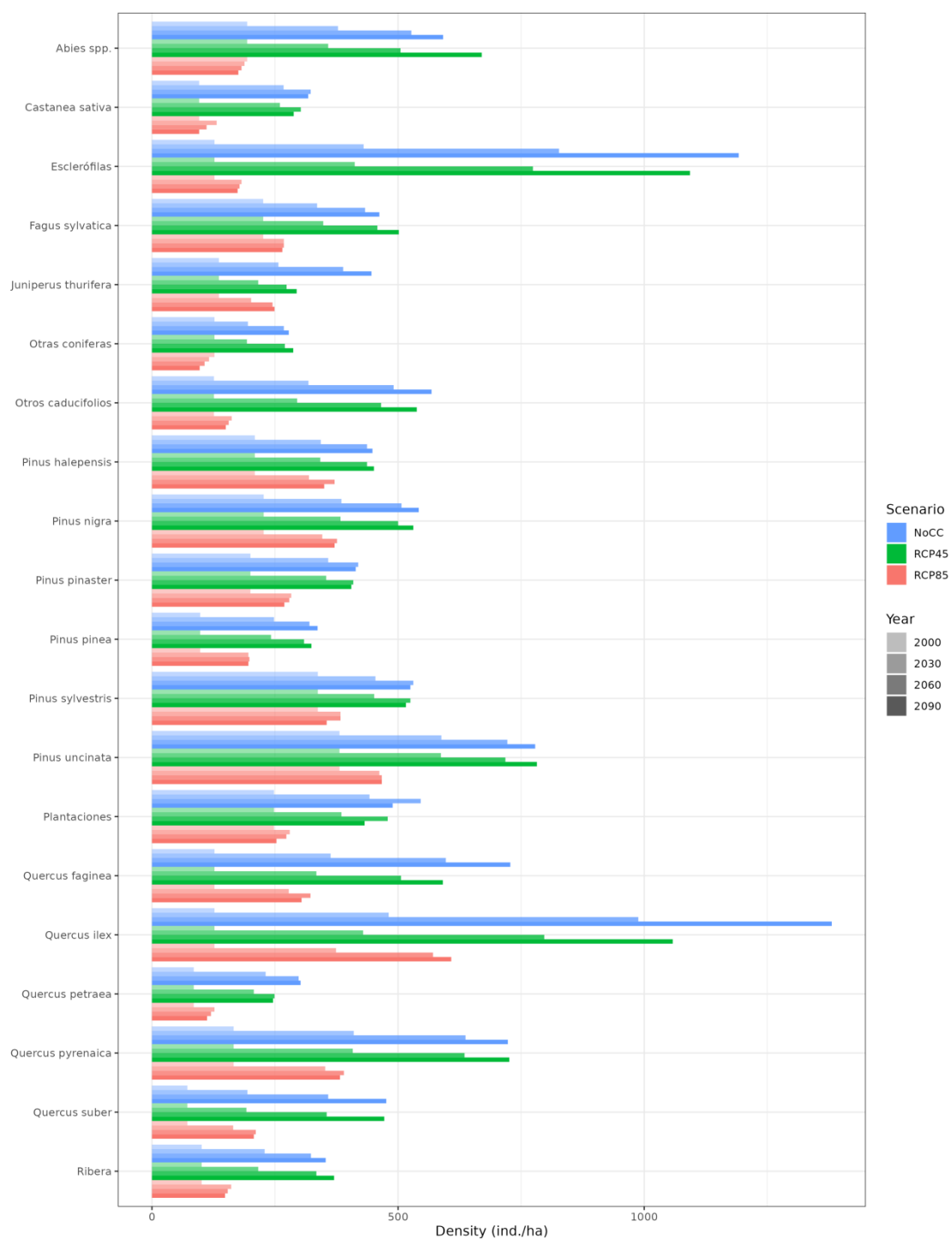


Fig. 4.1.2. Densidad de árboles (individuos por hectárea) media para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

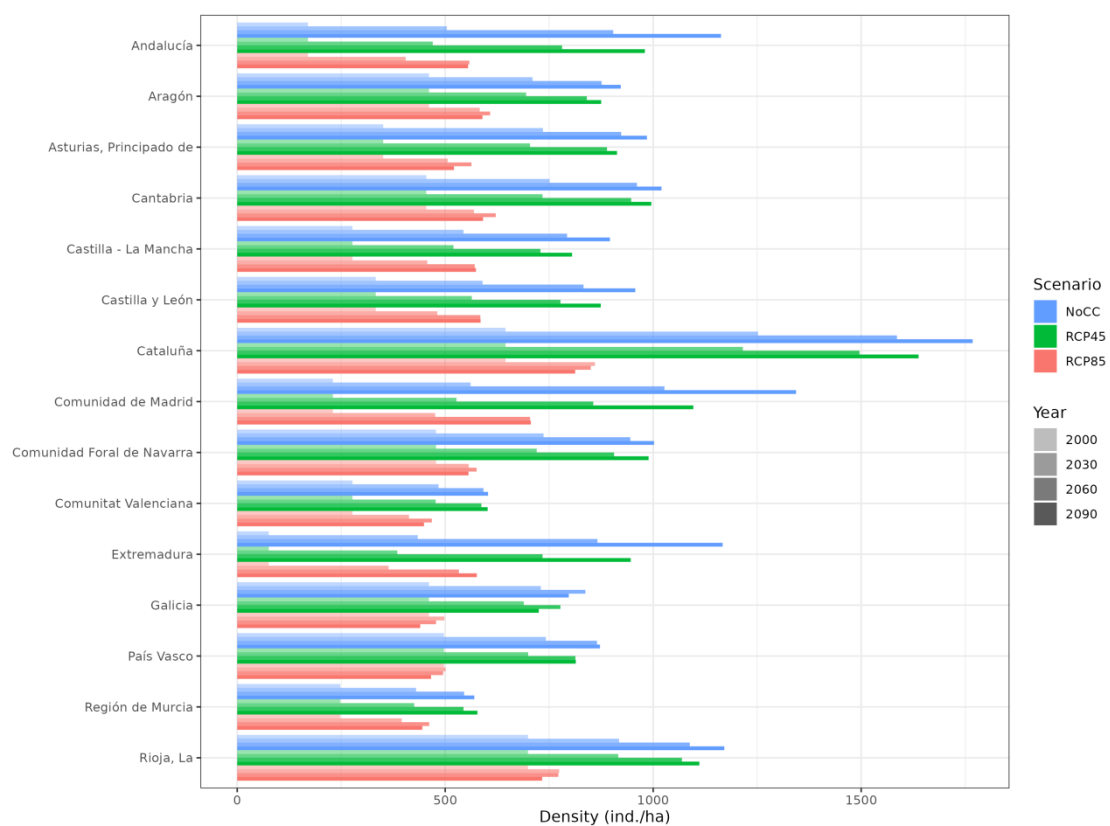


Fig. 4.1.3. Densidad de árboles (individuos por hectárea) media en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

Área basimétrica

El área basimétrica aumenta para todas las especies (Fig. 4.1.5), pero destacan el castaño (*Castanea sativa*), y las plantaciones (i.e., chopos, eucaliptos y pino insignie), todas ellas especies de crecimiento rápido. En menor medida seguirían el pino rodeno (*Pinus pinaster*), el haya (*Fagus sylvatica*) y el pino albar (*Pinus sylvestris*). Desde el punto de vista geográfico, es en las comunidades autónomas del noroeste con más plantaciones, como Galicia, Asturias y el País Vasco, donde se producen aumentos mayores de área basimétrica (Figs. 4.1.4 y 4.1.6), seguidas de otras comunidades del norte, como La Rioja, Navarra, Cataluña y Aragón. Los escenarios con cambio climático tienden a reducir los incrementos en área basimétrica para la mayoría de especies y en la mayoría de comunidades.

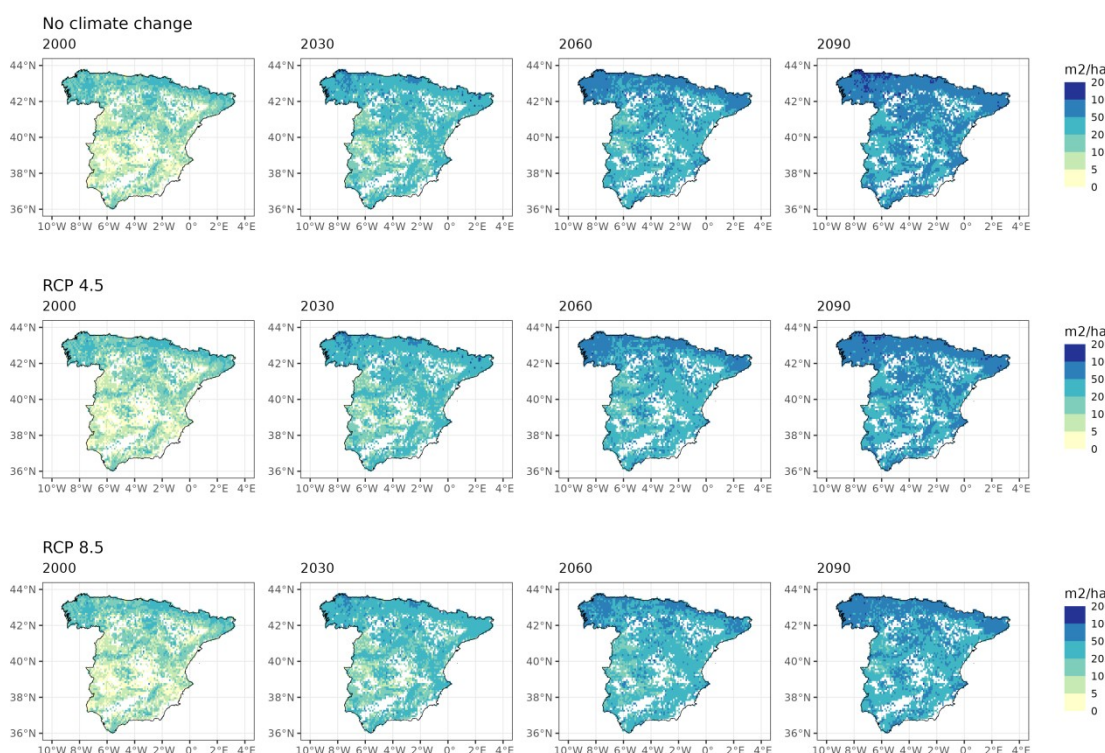


Fig. 4.1.4. Distribución geográfica del área basimétrica (m^2 por hectárea) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

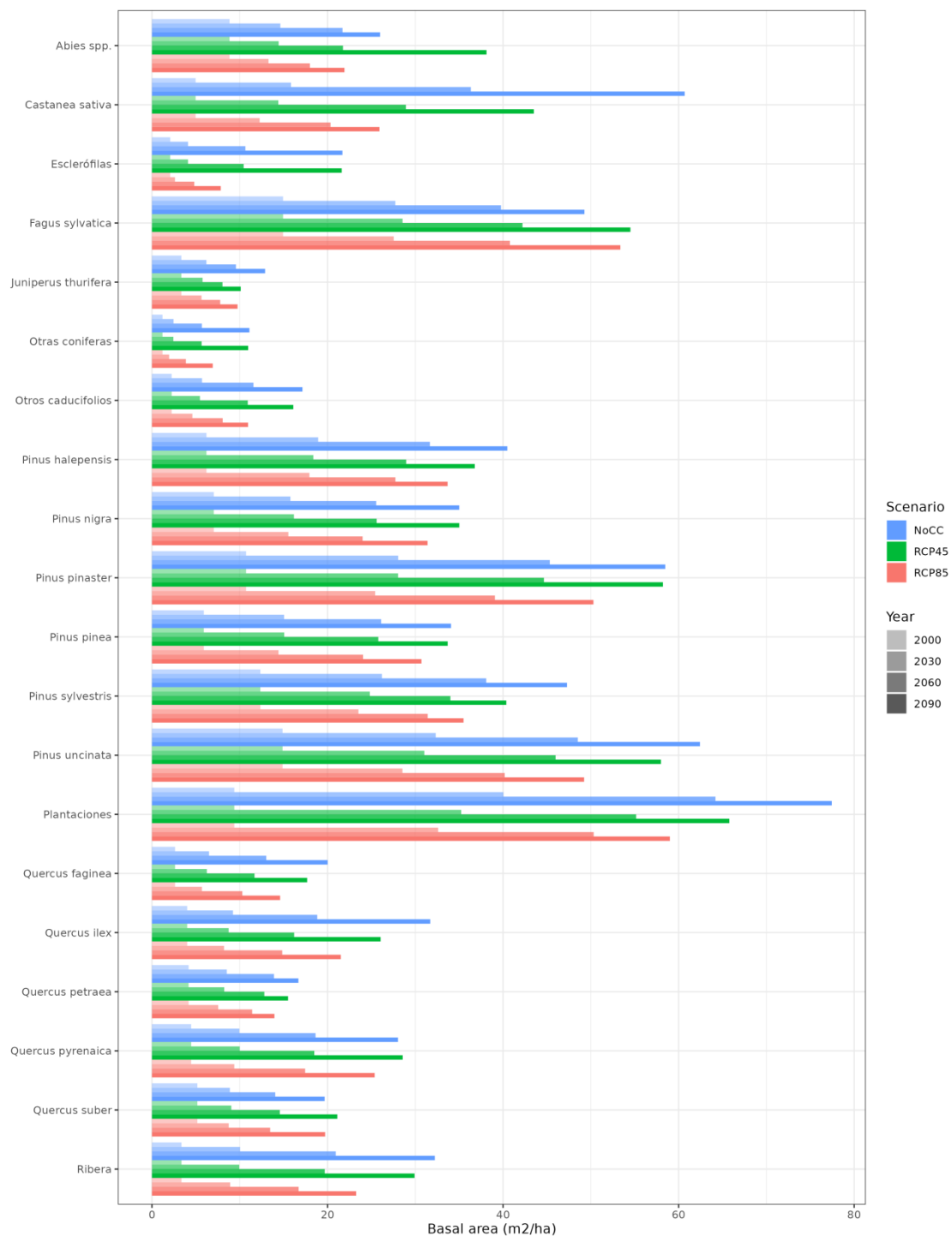


Fig. 4.1.5. Área basimétrica (m² por hectárea) media para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

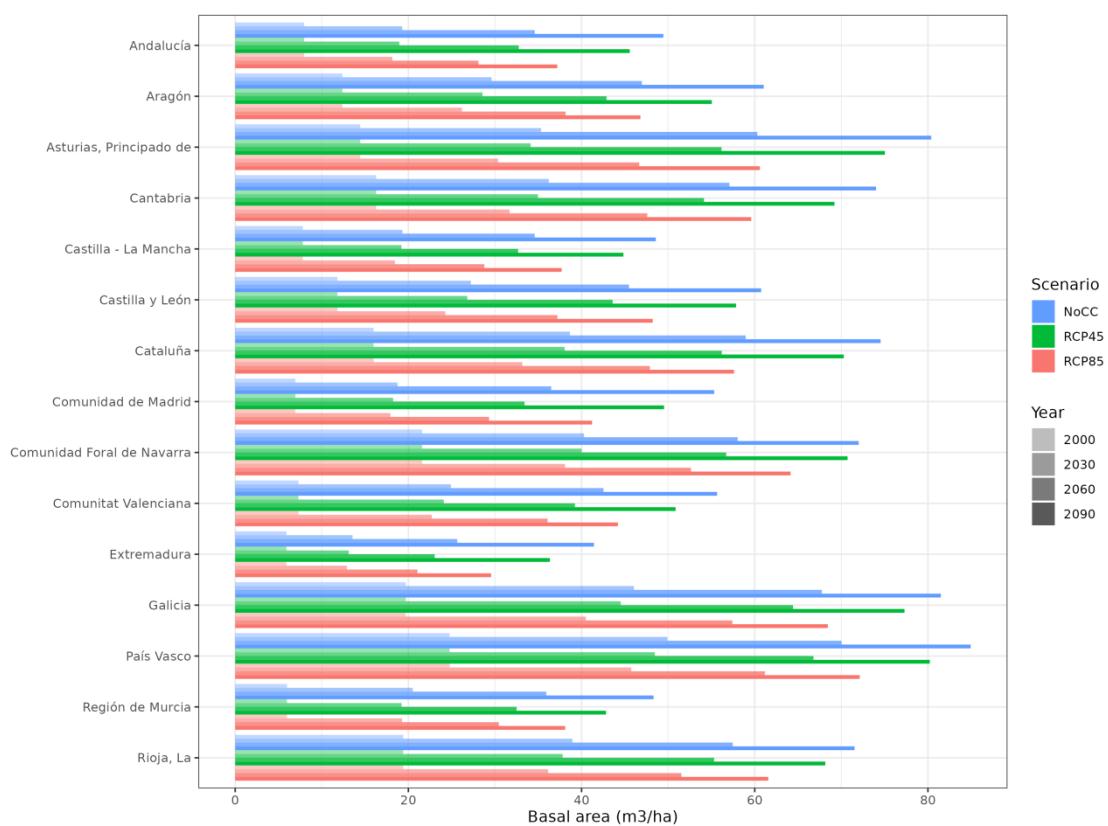


Fig. 4.1.6. Área basimétrica (m^2 por hectárea) media en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

4.2 Materias primas: madera estructural

Dado que los bosques españoles actuales son, en general, bastante jóvenes, en muchos de ellos los diámetros de los árboles no llegan al umbral de madera estructural empleado (22.5 cm). Por ese motivo el **stock de madera estructural aumenta** enormemente entre inicio y final de siglo (desde 16 m³/ha a 223-252 m³/ha; Tabla 4.2.1.a), aunque la acumulación de madera es ligeramente menor para los escenarios con cambio climático, llegando a un 12% menos de stock para el escenario RCP8.5 a finales de siglo (Tabla 4.2.1.b). En todo caso, y dado que no se consideran perturbaciones antrópicas o naturales como los incendios, la tendencia de los bosques es a acumular madera. La oferta anual de madera (velocidad de acumulación) aumenta entre el inicio de la simulación y mediados de siglo, pero se reduce posteriormente, siendo mayores las reducciones bajo el cambio climático.

(a) Escenario climático	Stock (m ³ /ha)				Oferta anual (m ³ /ha/yr)		
	2000	2030	2060	2090	2000-2030	2030-2060	2060-2090
Clima constante	16	90	179	253	2,0	2,5	2,3
RCP 4.5	16	88	166	233	2,0	2,2	2,0
RCP 8.5	16	86	164	223	1,9	2,2	1,7

(b) Escenario climático	Stock (% clima constante)				Oferta anual (% clima constante)		
	2000	2030	2060	2090	2000-2030	2030-2060	2060-2090
RCP 4.5	0	-2,2	-6,9	-8,0	-2,1	-12,5	-12,0
RCP 8.5	0	-4,3	-8,0	-11,7	-5,2	-12,7	-24,9

Tabla 4.2.1. (a) Promedio peninsular del stock y oferta de madera estructural para los años/periodos considerados. (b) Porcentaje de variación de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a los valores del escenario de clima constante para el mismo periodo/año.

Stock de madera estructural

En concordancia con los cambios en área basimétrica, es en las plantaciones donde se produce una mayor acumulación de madera estructural (Fig. 4.2.2) debido a su mayor rapidez de crecimiento. Geográficamente, esto resulta en una mayor acumulación de madera estructural en comunidades del noroeste peninsular, como Galicia, Asturias y el País Vasco, que es donde abundan más las plantaciones (Fig. 4.2.1 y 4.2.3). Es importante notar para el uso de estos resultados que no se ha considerado la corta de las plantaciones, que en algunos casos se realiza cuando los árboles tienen aún diámetros pequeños.

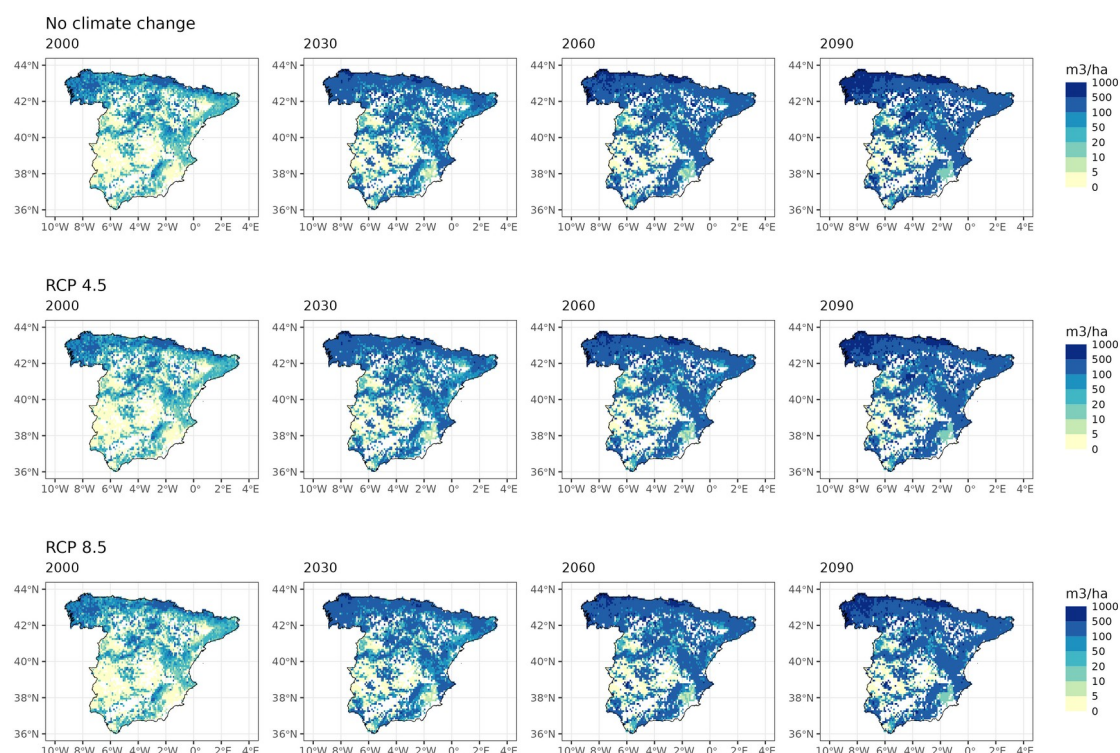


Fig. 4.2.1. Distribución geográfica del stock de madera estructural (m^3 por hectárea) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

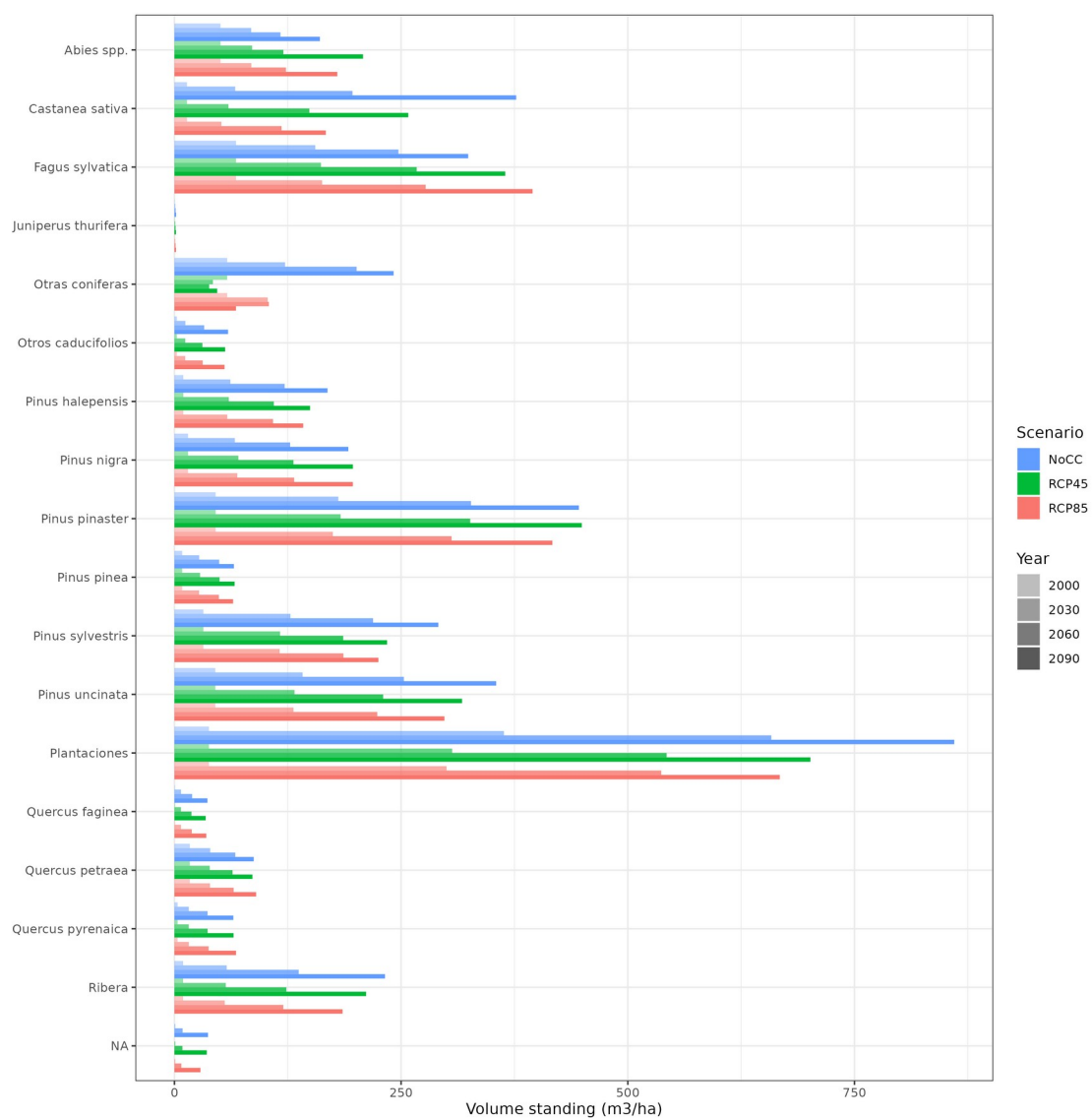


Fig. 4.2.2. Stock de madera estructural (m³ por hectárea) promedio para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

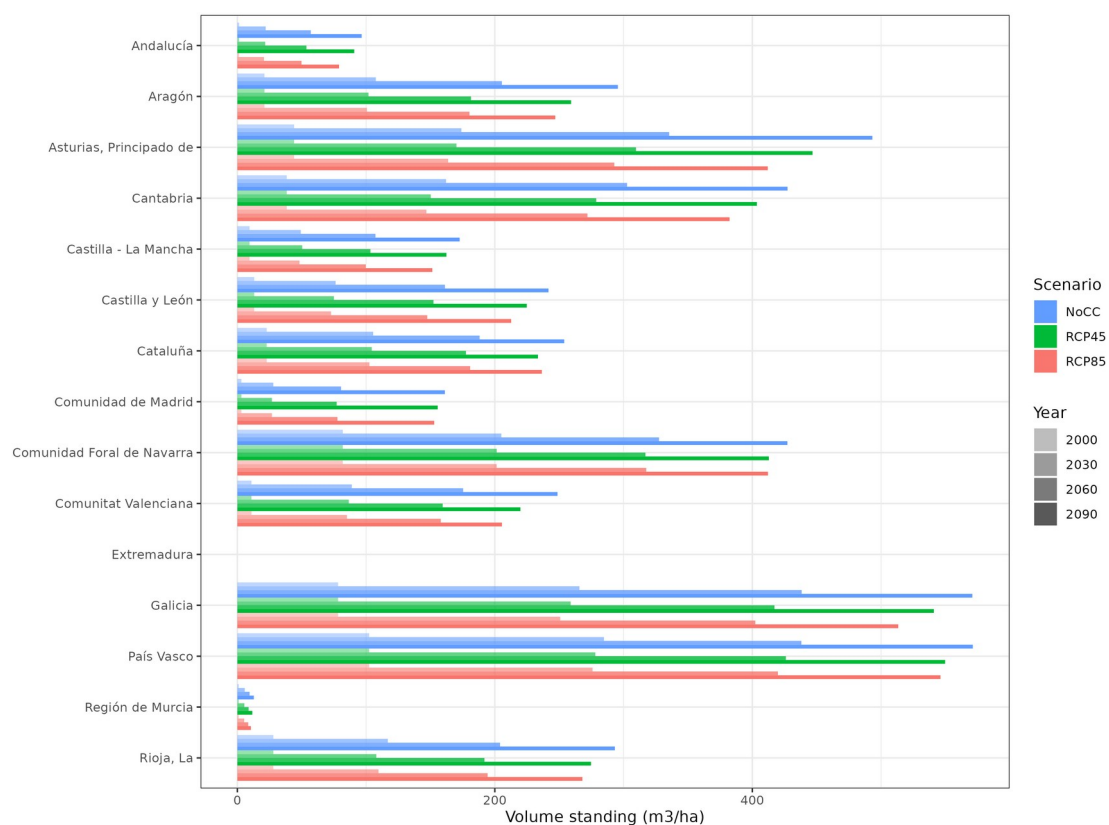


Fig. 4.2.3. Stock de madera estructural (m³ por hectárea) medio en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

Oferta de madera estructural

Debido a su mayor tasa de crecimiento y diámetros inicialmente pequeños, la mayor oferta de madera estructural se da en las plantaciones (Fig. 4.2.5). Sin embargo, también es en las especies de plantaciones donde la oferta de madera se reduce más a finales de siglo y donde se notan con mayor efecto los impactos del cambio climático. En otras especies como el pino rodeno (*P. pinaster*) la oferta de madera es menor pero más constante a lo largo del siglo y menos sensible a los cambios climáticos. Dichos resultados se traducen también a nivel geográfico (Fig. 4.2.4 y 4.2.6), siendo las comunidades donde abundan las plantaciones las que siguen el patrón mostrado por éstas.

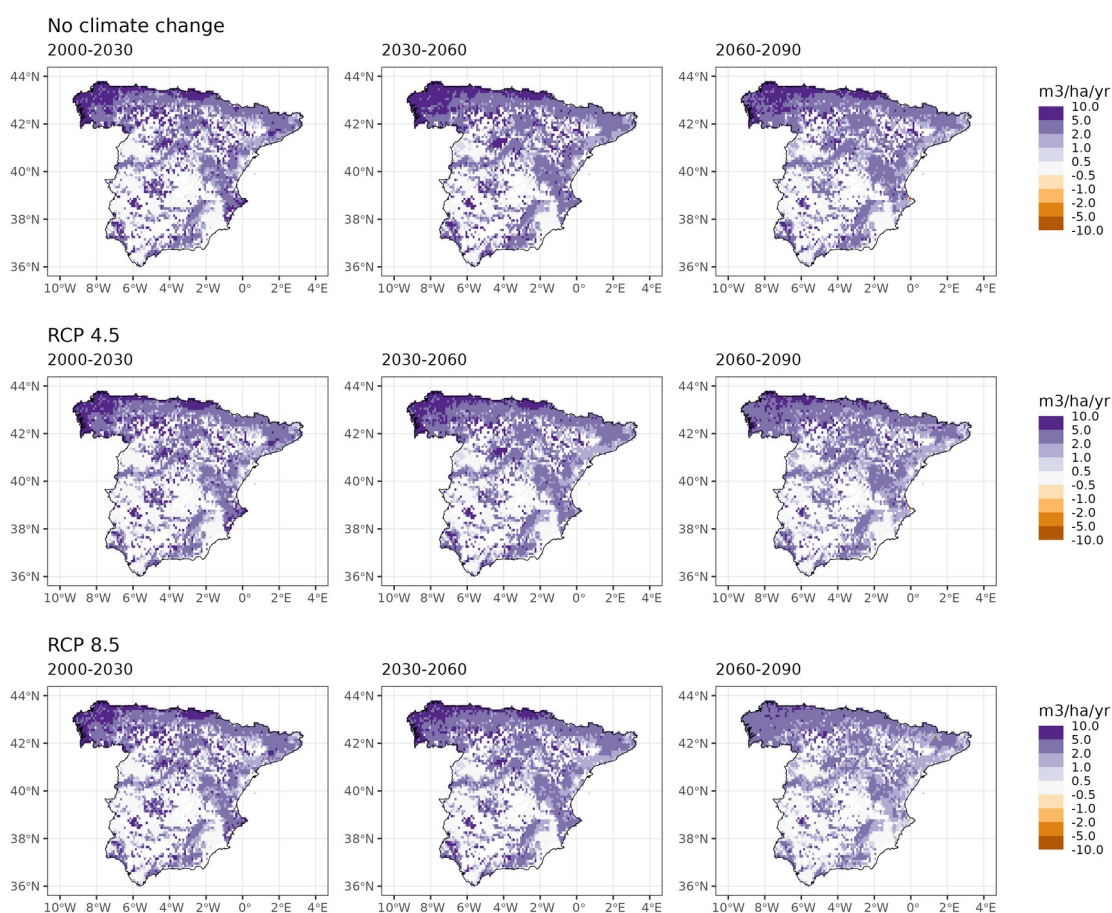


Fig. 4.2.4. Distribución geográfica de la oferta de madera estructural (m³ por hectárea y año) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

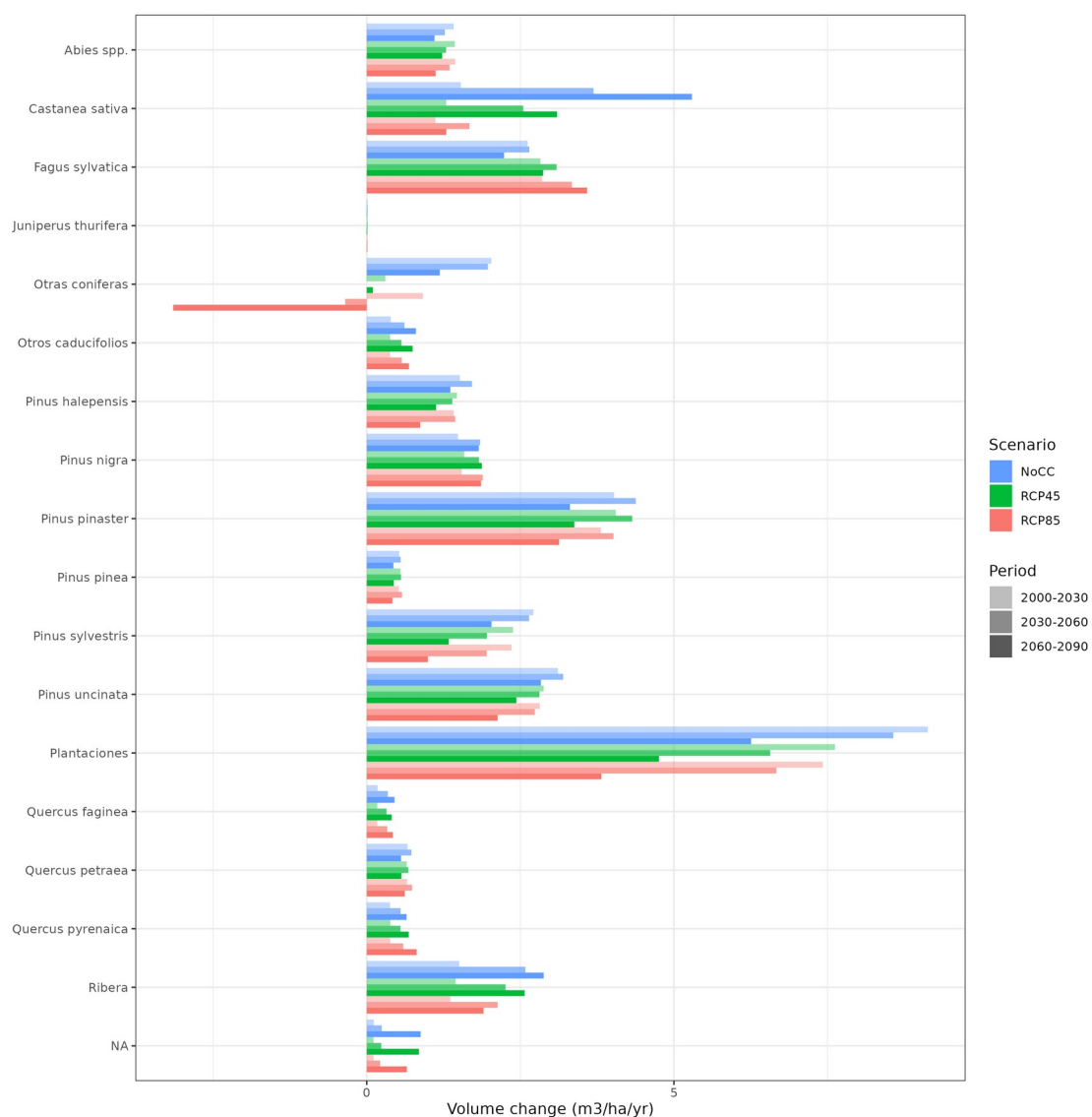


Fig. 4.2.5. Oferta de madera estructural (m³ por hectárea y año) media para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

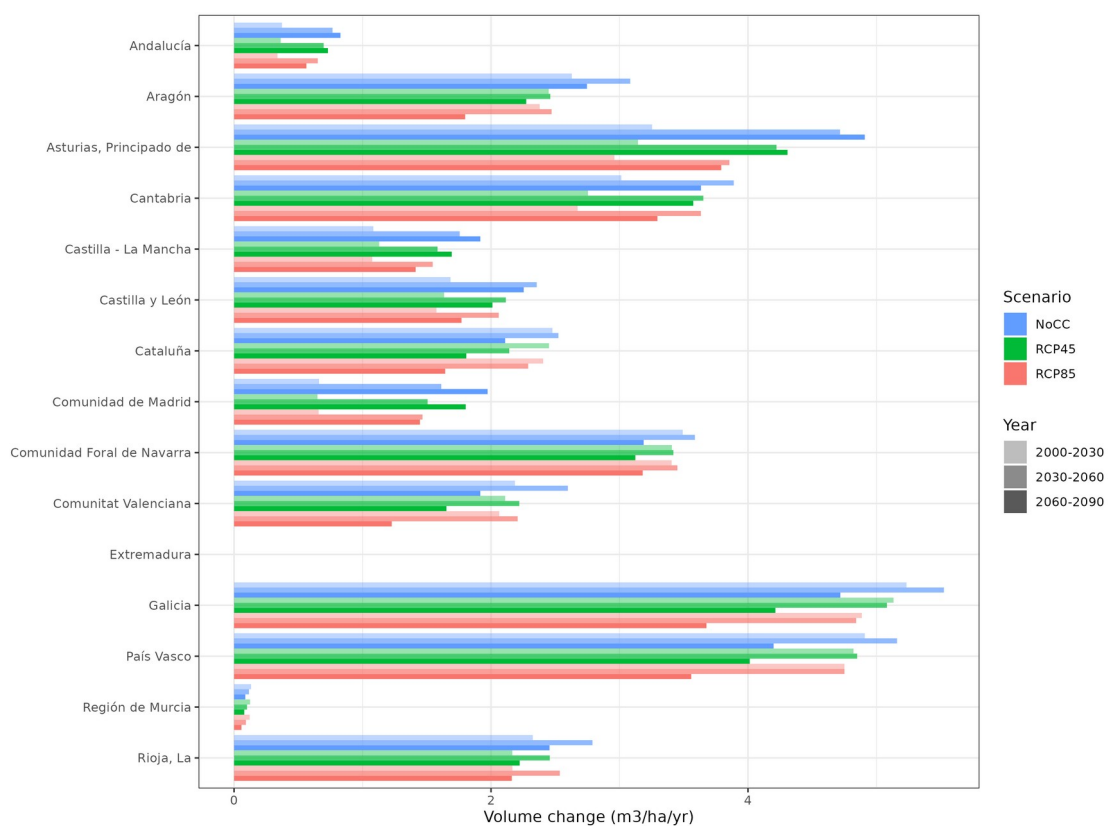


Fig. 4.2.6. Oferta de madera estructural (m³ por hectárea y año) media en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

4.3 Materias primas: leñas

La acumulación de stock de leñas a lo largo de siglo se produce a una velocidad (oferta anual) bastante menor que el de maderas (Tabla 4.3.1.a). Ello es debido a que las especies consideradas fuente de leña (encinas, alcornoques y otras esclerófilas) tienen en general un crecimiento más lento que las especies de madera estructural. Sin embargo, el stock de leñas aumenta de 17 m³/ha a 49 m³/ha entre el inicio y el final de siglo bajo un escenario de clima constante (Tabla 4.3.1.a). A diferencia de la oferta en madera estructural, la oferta en leñas se reduce paulatinamente a lo largo de todo el siglo, indicando una progresiva saturación del bosque, aunque los promedios peninsulares de oferta son positivos para los tres periodos considerados bajo un escenario sin cambio climático o con un cambio moderado. Cuando se considera un cambio climático más severo, la acumulación de leñas es mucho más pequeña (el stock es un 55% menor a finales de siglo; Tabla 4.3.1.b) y la oferta se vuelve negativa (es decir, se produce una disminución del stock) hacia mediados de siglo.

(a) Escenario climático	Stock (m ³ /ha)				Oferta anual (m ³ /ha/yr)		
	2000	2030	2060	2090	2000-2030	2030-2060	2060-2090
Clima constante	19	33	46	49	0,45	0,35	0,05
RCP 4.5	19	31	42	45	0,40	0,32	0,06
RCP 8.5	19	25	27	22	0,20	-0,02	-0,06

(b) Escenario climático	Stock (% clima constante)				Oferta anual (% clima constante)		
	2000	2030	2060	2090	2000-2030	2030-2060	2060-2090
RCP 4.5	0,0	-4,1	-8,7	-8,1	-9,6	-9,4	+17,6
RCP 8.5	0,0	-22,3	-40,7	-54,8	-54,6	-106,2	-220,7

Tabla 4.3.1. (a) Promedio peninsular de la reserva y oferta de leñas para los años/periodos considerados. (b) Porcentaje de variación de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a los valores del escenario de clima constante para el mismo periodo/año.

Stock de leñas

Cuando examinamos la evolución del stock de leñas por especie observamos resultados consistentes con el diseño del indicador. Las especies que se consideran fuentes de leña independientemente del diámetro de los árboles (encinas, alcornoques y otras esclerófilas) aumentan de manera sostenida su stock de leña (Fig. 4.3.2). Sin embargo, las restantes especies muestran un estancamiento (o una disminución en el caso de algunas, como castaños y las plantaciones), debido a que los árboles pasan a tener diámetros aptos para el uso de madera estructural. Geográficamente, esto se traduce en un aumento del stock de leñas en zonas donde abundan las encinas y carrascas, como Extremadura, Cataluña o partes de Andalucía (Figs. 4.3.1 y 4.3.4), mientras que en comunidades con abundancia de plantaciones el stock de leñas es pequeño e incluso se reduce bajo un escenario de cambio climático severo.

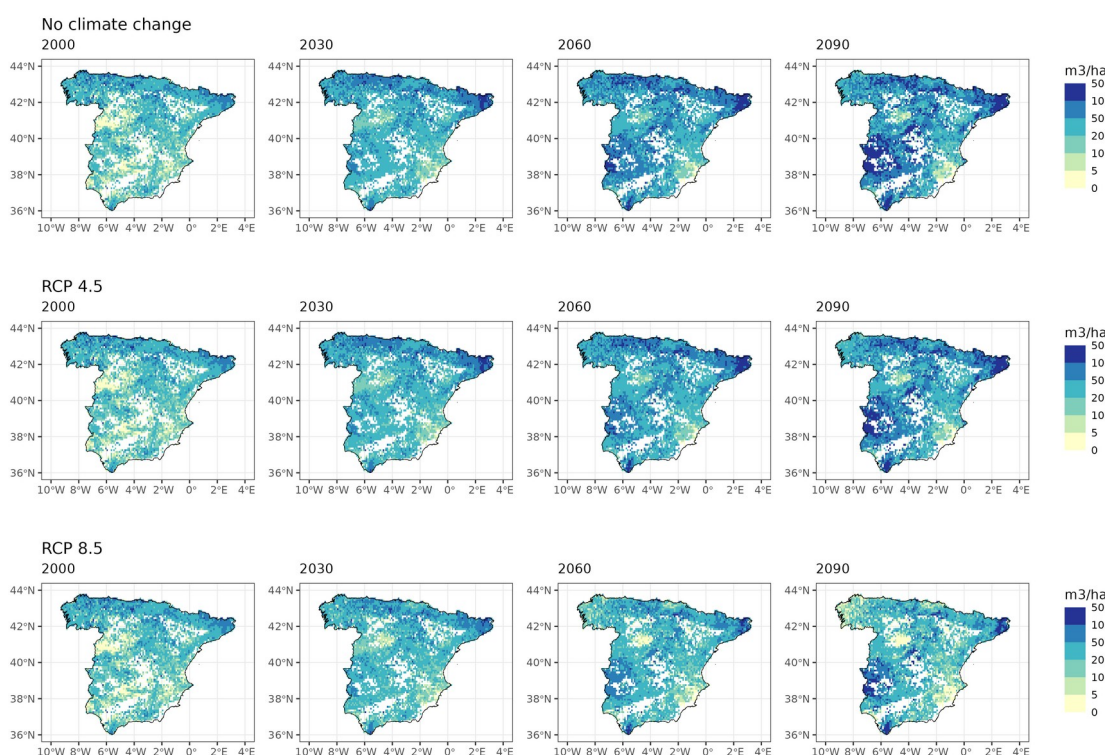


Fig. 4.3.1. Distribución geográfica del stock de leñas (m³ por hectárea) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

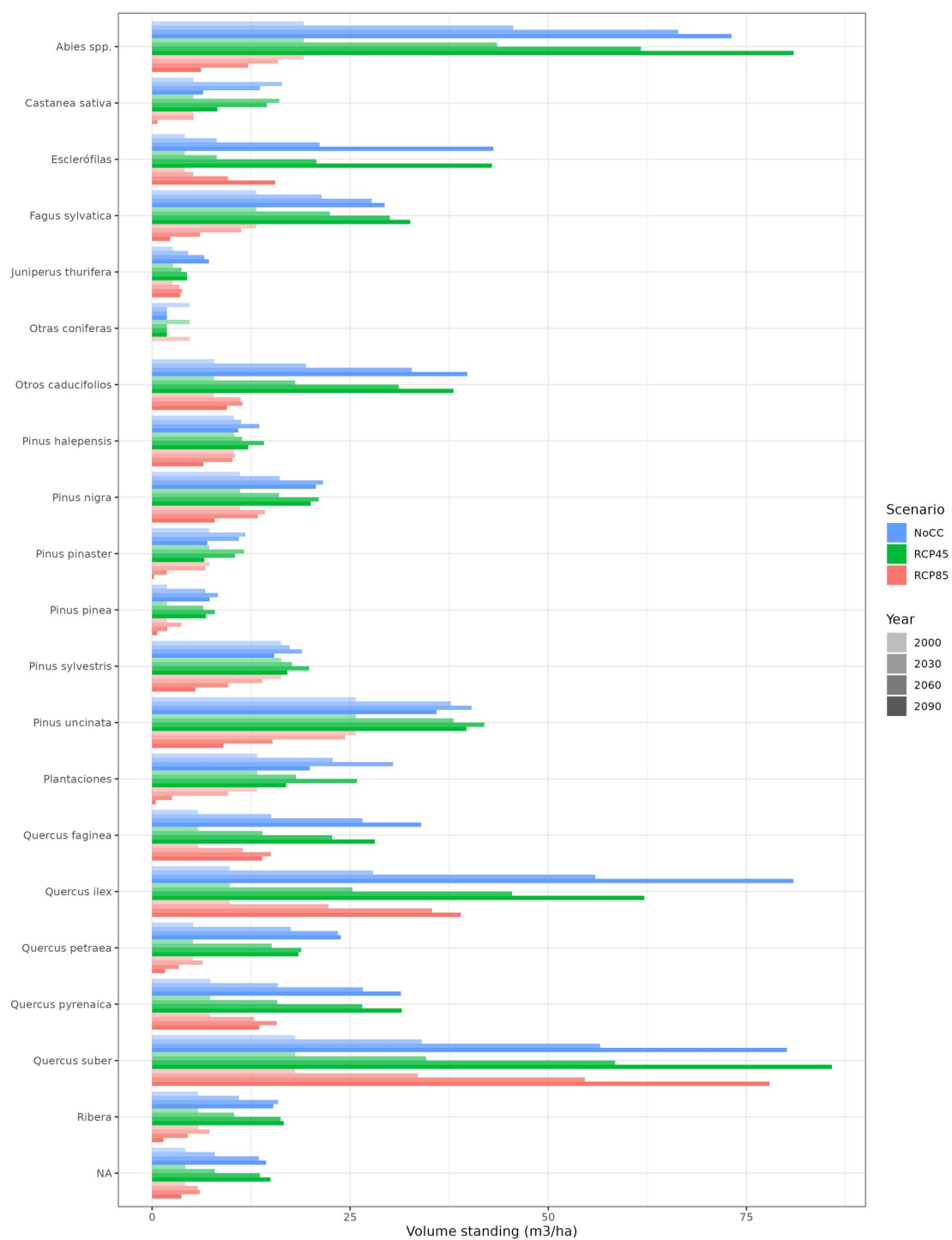


Fig. 4.3.2. Reserva de leñas (m³ por hectárea) promedio para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

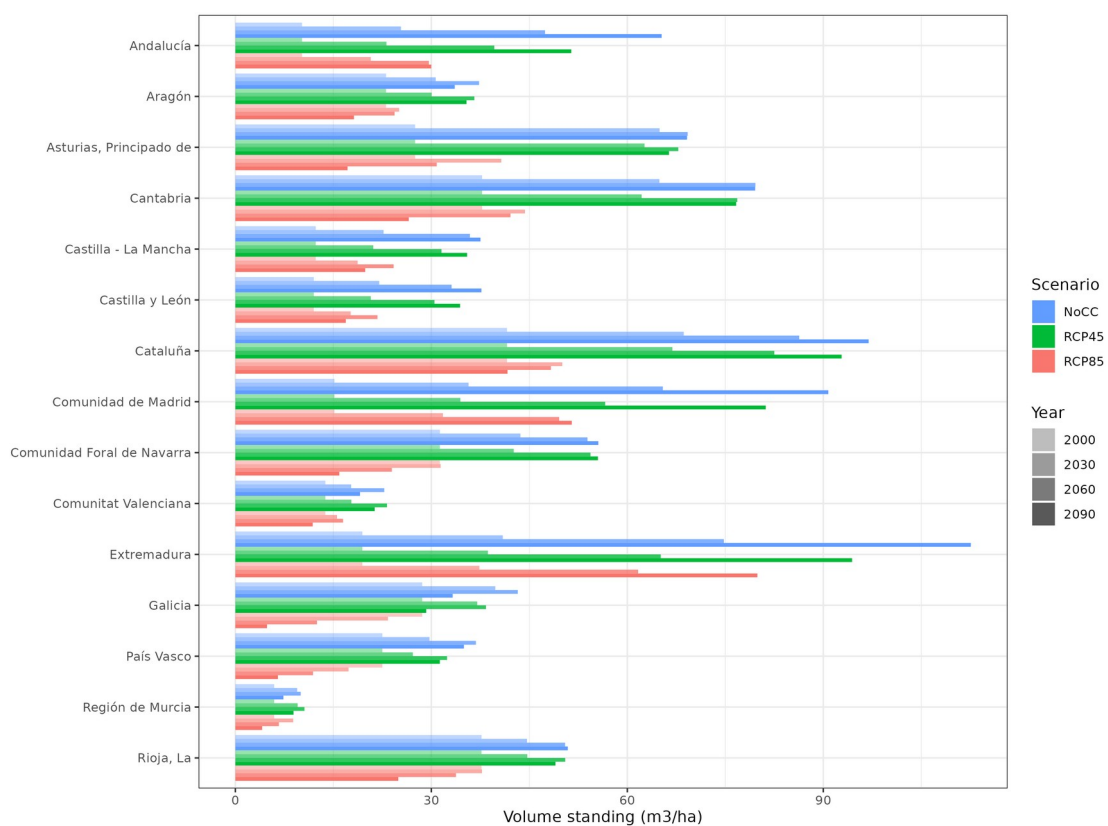


Fig. 4.3.3. Reserva de leñas (m³ por hectárea) promedio en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados

Oferta de leñas

La **oferta de leñas (tasa de acumulación)** es **positiva** durante todo el siglo bajo un escenario sin cambio climático para las especies que proveen dicho servicio: encinas, alcornoques y especies esclerófilas (Fig. 4.3.5). Sin embargo, su oferta se ve reducida bajo escenarios con cambio climático. Debido que solo proveen leñas cuando tienen diámetros pequeños, la oferta de las demás especies se vuelve negativa (disminución del stock) a medida que avanza el siglo. El cambio climático acentúa esta tendencia dado que los crecimientos son más lentos. Estas diferencias entre se traducen también a nivel geográfico, siendo el noroeste donde se observa una oferta de leñas negativa, especialmente con cambio climático, mientras que en las comunidades donde encinas y/o alcornoques son frecuentes (Extremadura, Andalucía, Madrid y Cataluña) la oferta de leñas se mantiene positiva e incluso aumenta en algunas zonas bajo el escenario sin cambio climático (Figs. 4.3.4 y 4.3.6).

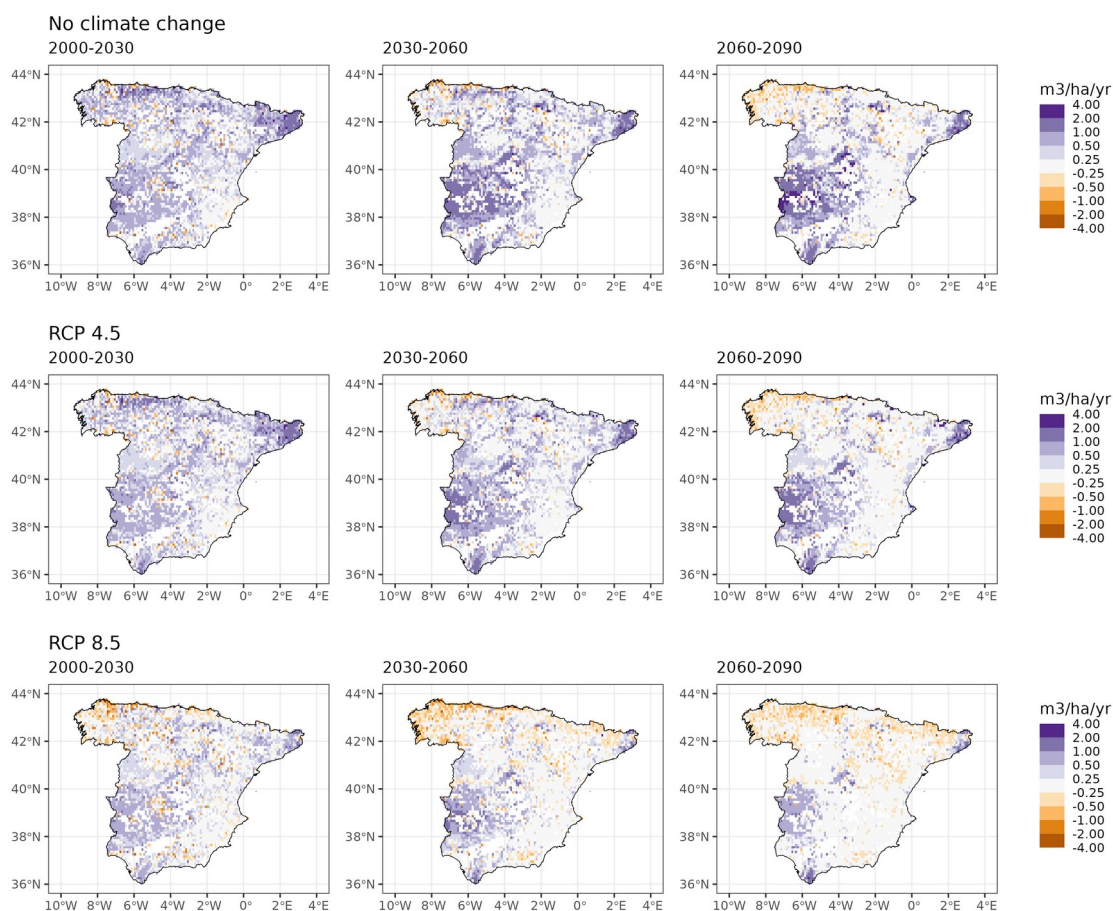


Fig. 4.3.4. Distribución geográfica de la oferta de leñas (m^3 por hectárea y año) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

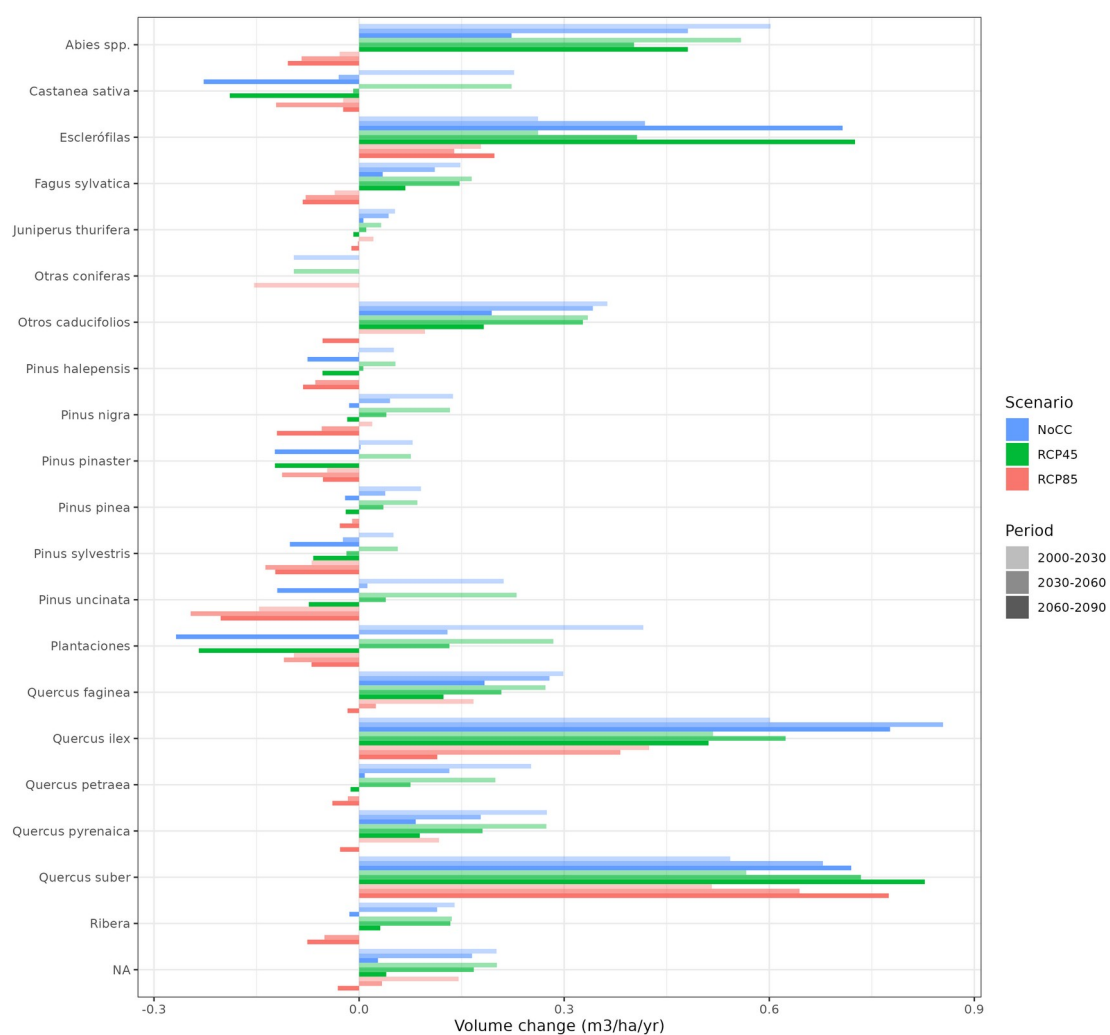


Fig. 4.3.6. Oferta de leñas (m³ por hectárea y año) media para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

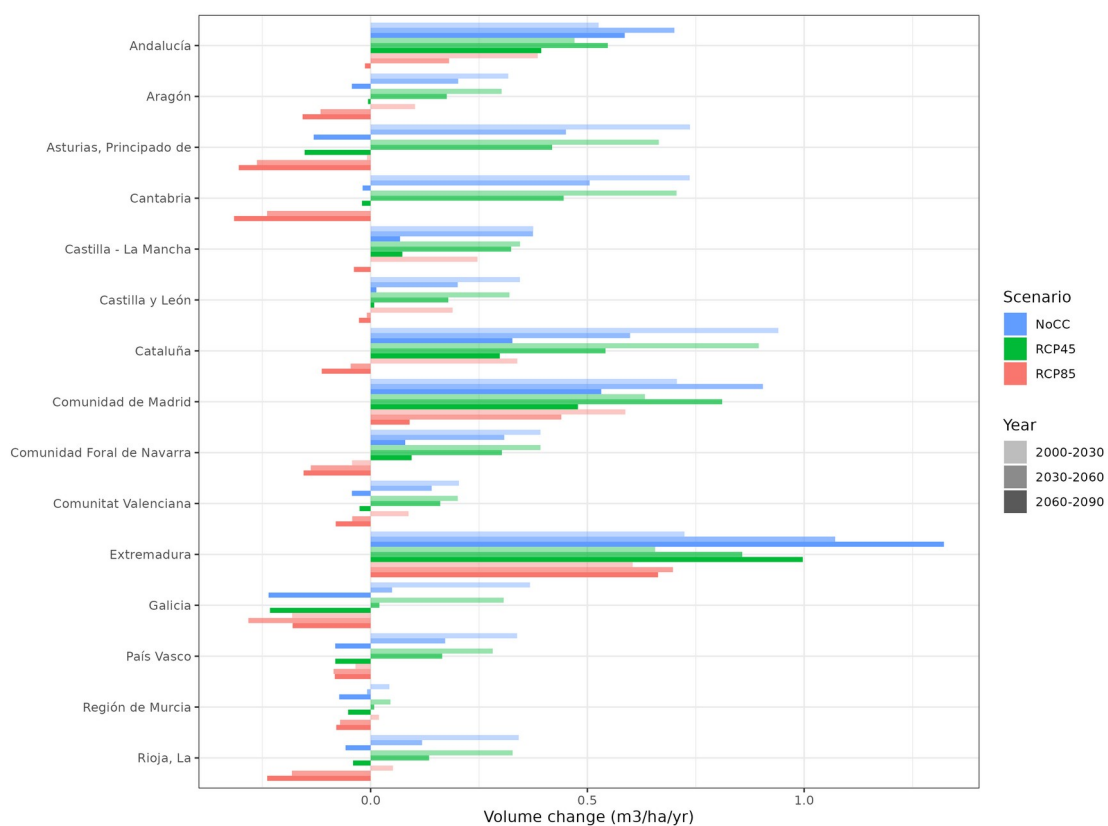


Fig. 4.3.6. Oferta de leñas (m³ por hectárea y año) media en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

4.4 Regulación climática

Siguiendo los resultados obtenidos para el stock de madera estructural, el **stock de carbono aumenta** de forma sostenida entre el principio y el final del s. XXI (de 160 Mg/ha a 980 Mg/ha) bajo un escenario de clima constante. Dichos aumentos de stock de carbono són menores bajo escenarios con cambio climático, siendo las acumulaciones un 21% menores (hasta 775 t CO₂/ha) bajo el escenario climático más severo (Tabla 4.4.1). El sumidero de carbono (tasa de acumulación; t CO₂/ha/año) crece ligeramente desde inicios hasta mediados de siglo, pero empieza a disminuir (p. ej. se ralentiza la acumulación) hacia finales de siglo. En cuanto a este indicador, los tres escenarios siguen un patrón similar, aunque las tasas de sumidero de carbono son siempre menores bajo escenarios con cambio climático, llegando a ser un 29% inferiores hacia finales de siglo para el escenario de clima más severo respecto al escenario de clima constante.

(a) Escenario climático	Stock de carbono (t CO ₂ /ha)				Sumidero de carbono (t CO ₂ /ha/yr)		
	2001	2031	2061	2091	2001-2030	2031-2060	2061-2090
Clima constante	161	416	705	979	7,7	9,0	8,3
RCP 4.5	161	405	655	901	7,4	8,1	7,6
RCP 8.5	161	379	596	776	6,6	7,0	5,9
(b) Escenario climático	Stock de carbono (% c. c.)				Sumidero de carbono (% c. c.)		
	2001	2031	2061	2091	2001-2030	2031-2060	2061-2090
RCP 4.5	0.0	-2,7	-7,1	-8,0	-4,7	-10,2	-8,2
RCP 8.5	0.0	-8,9	-15,4	-20,7	-14,4	-22,7	-29,0

Tabla 4.4.1. (a) Promedio peninsular del stock de carbono y las tasas de sumidero de carbono para los años/periodos considerados. (b) Porcentaje de variación de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a los valores del escenario de clima constante para el mismo periodo/año.

Stock de carbono

Como en el caso de la madera, **el stock de carbono aumenta** en todas las especies, pero de forma más notable en el castaño, el haya y las especies de plantaciones (Fig. 4.4.2). Dicho resultado puede resultar engañoso en el tercer caso, dado que en algunas de dichas especies (p. ej. eucaliptos), se realizan cortas para papel cuando los árboles son de diámetro aún bastante pequeño. En cuanto a su sensibilidad a escenarios climáticos, las especies más afectadas son de nuevo el castaño y las plantaciones, mientras que otras se ven menos afectadas o sin diferencias entre escenarios. Geográficamente, de nuevo las provincias donde los stocks crecen más son Galicia, Cantabria, Asturias y el País Vasco (Fig. 4.4.1). Sin embargo, en todas las provincias (quizás con la excepción de Navarra) se aprecia una disminución en la tasa de acumulación de carbono debido al cambio climático (Fig. 4.4.3).

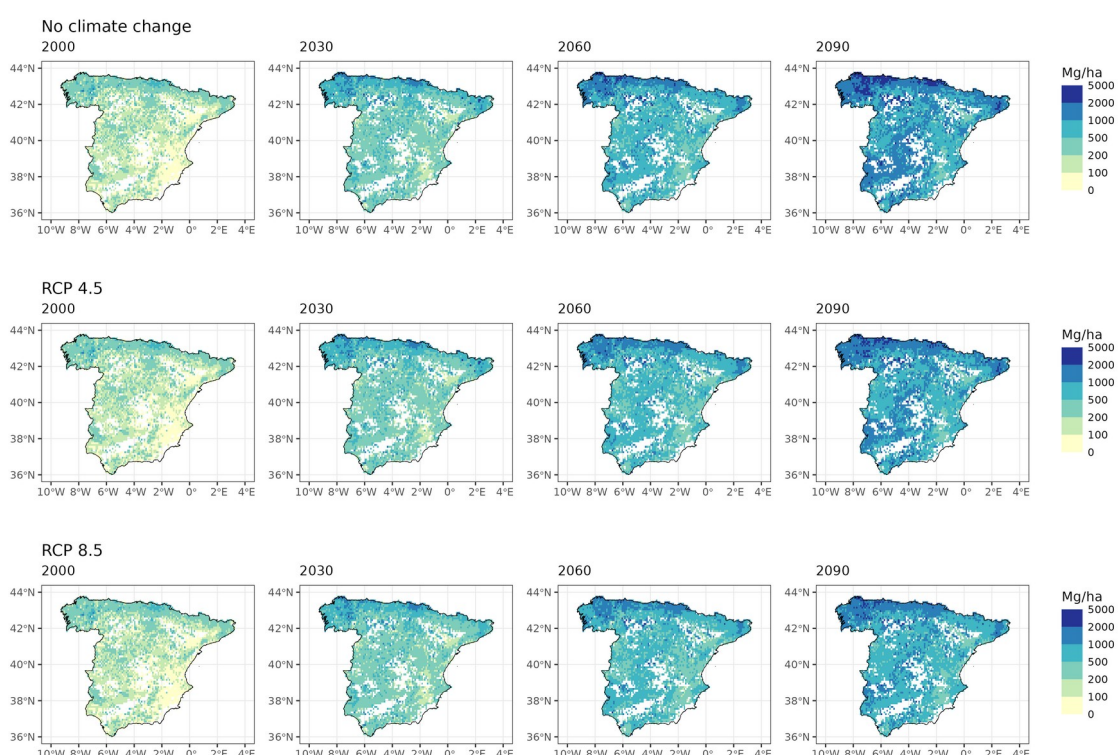


Fig. 4.4.1. Distribución geográfica del stock de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

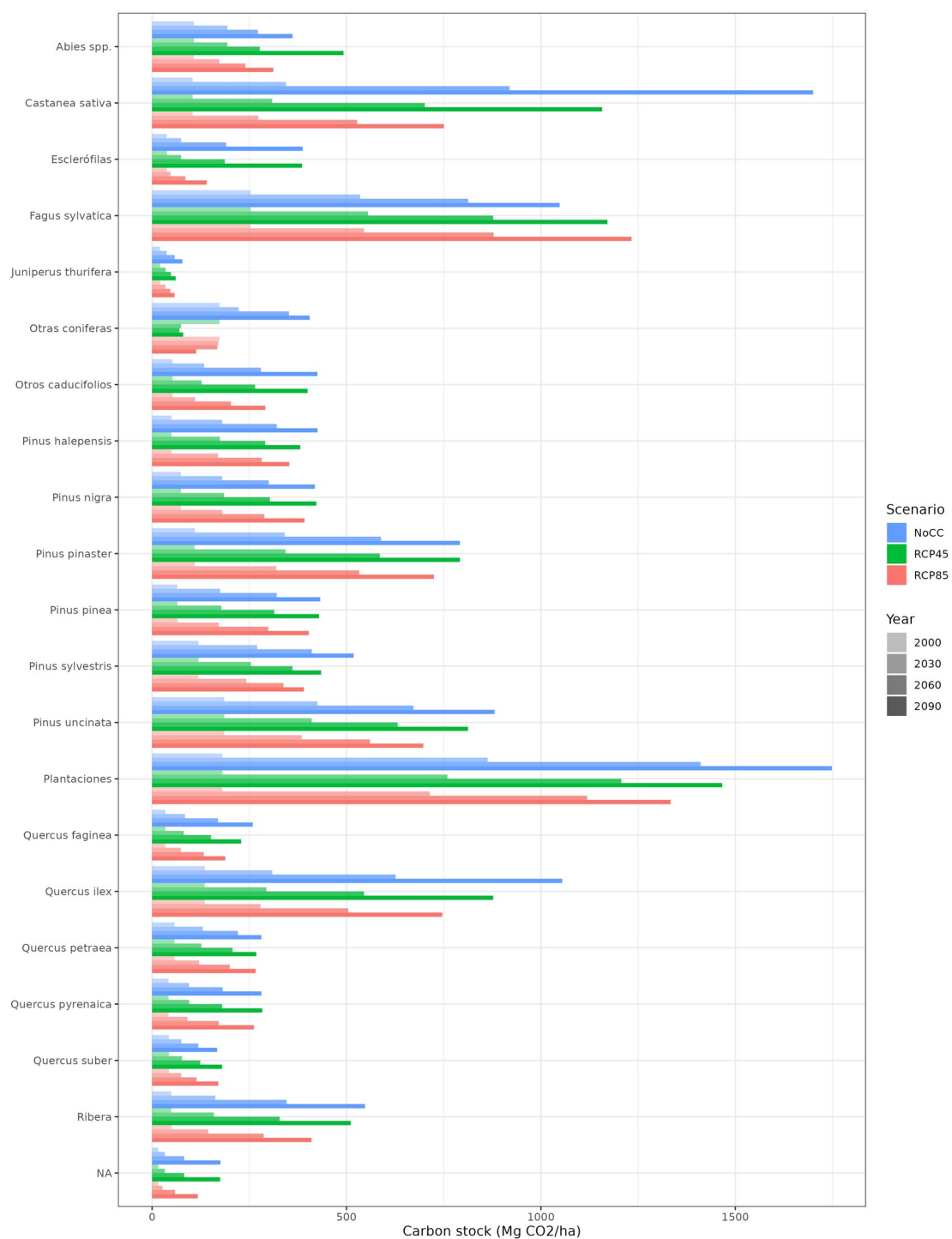


Fig. 4.4.2. Stock de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea) medio para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

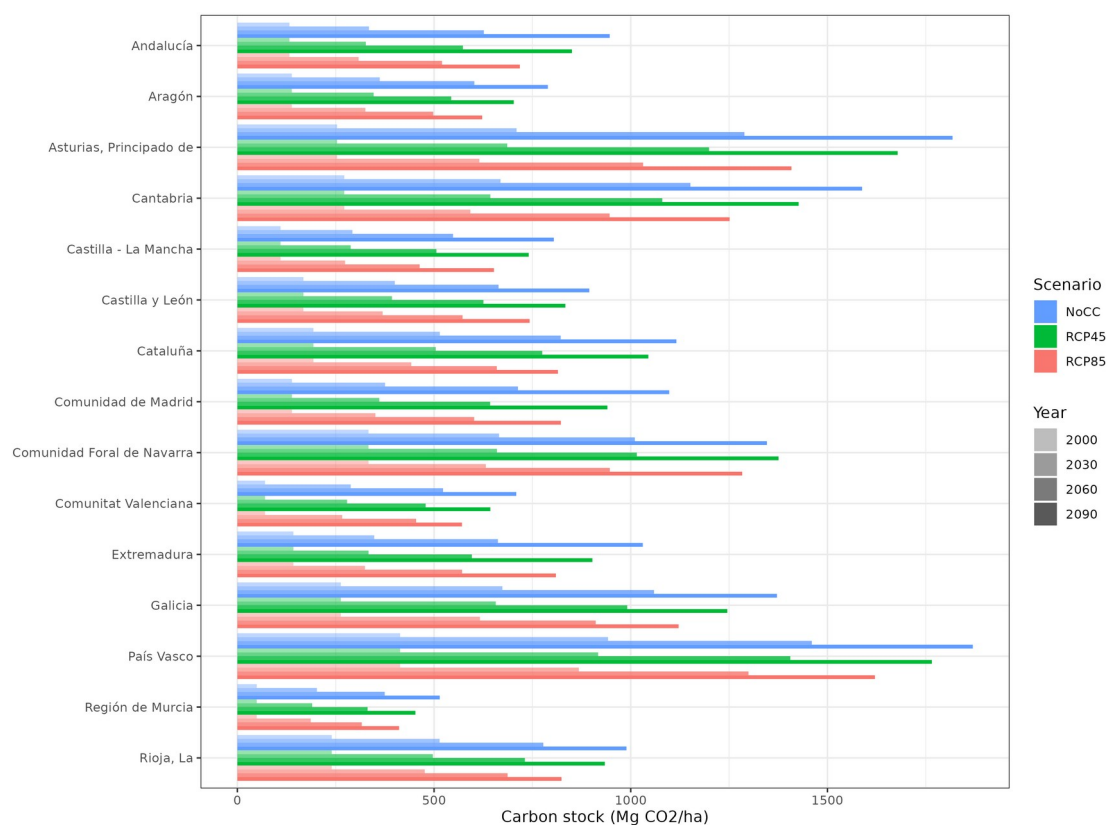


Fig. 4.4.3. Stock de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea) medio en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los años considerados.

Sumidero de carbono

Por especies, son los castaños los que contribuyen más a la función de sumidero de carbono, seguidos de las plantaciones (Fig. 4.4.5). En ambos casos, la **función de sumidero se reduce** considerablemente cuando consideramos los escenarios con cambio climático. En otras especies las tasas de acumulación de carbono en la biomasa son menores, pero se mantienen mucho más constantes. Geográficamente, son de nuevo las comunidades del noroeste aquellas que más contribuyen a la función de sumidero (aunque según el destino de las plantaciones esto puede variar). En el otro extremo se sitúan la Comunidad Valenciana y Murcia, debido a su aridez y menor densidad de sus bosques (Figs. 4.4.4 y 4.4.6). El resto de las comunidades autónomas contribuirían de un modo parecido a la función de sumidero.

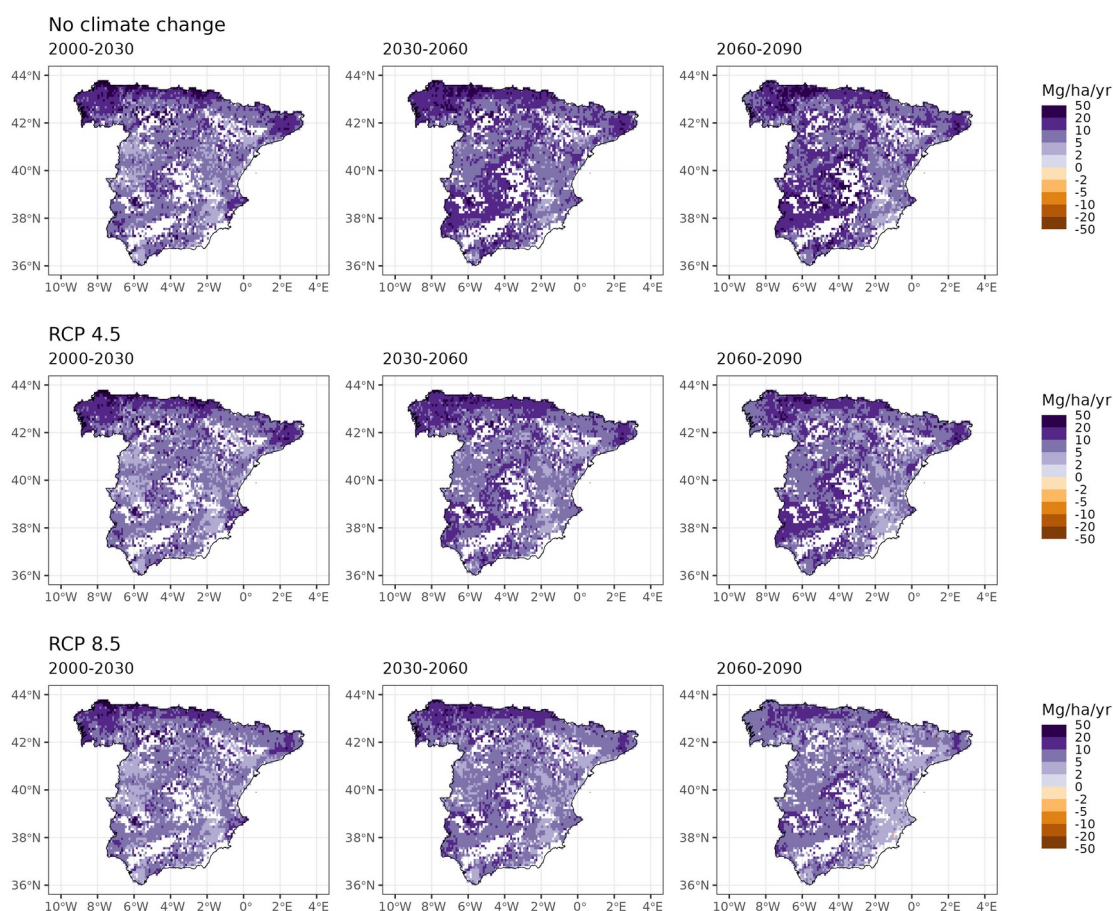


Fig. 4.4.4. Distribución geográfica del sumidero de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea y año) en las parcelas del IFN, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

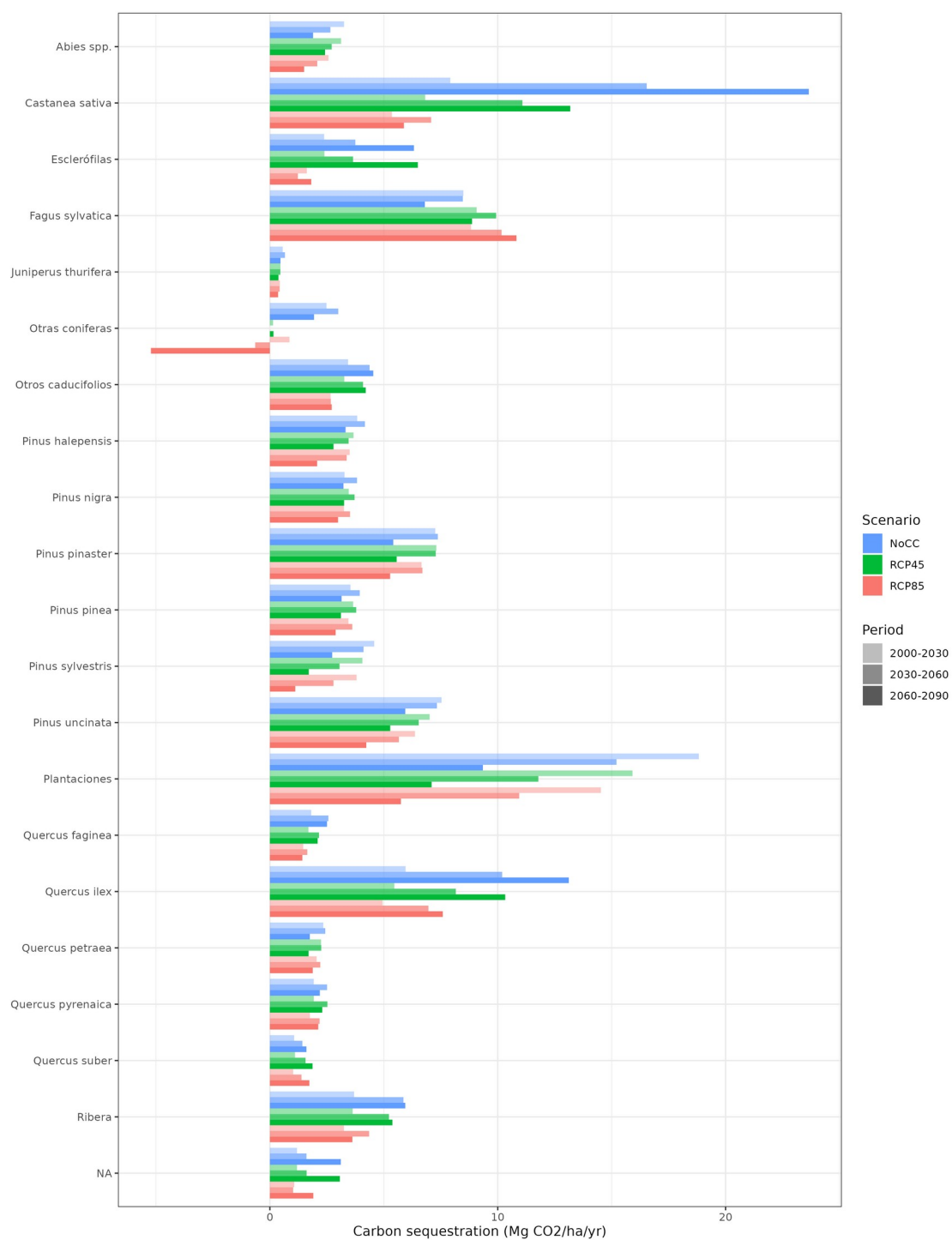


Fig. 4.4.5. Sumidero de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea y año) medio para distintas especies/grupos funcionales, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

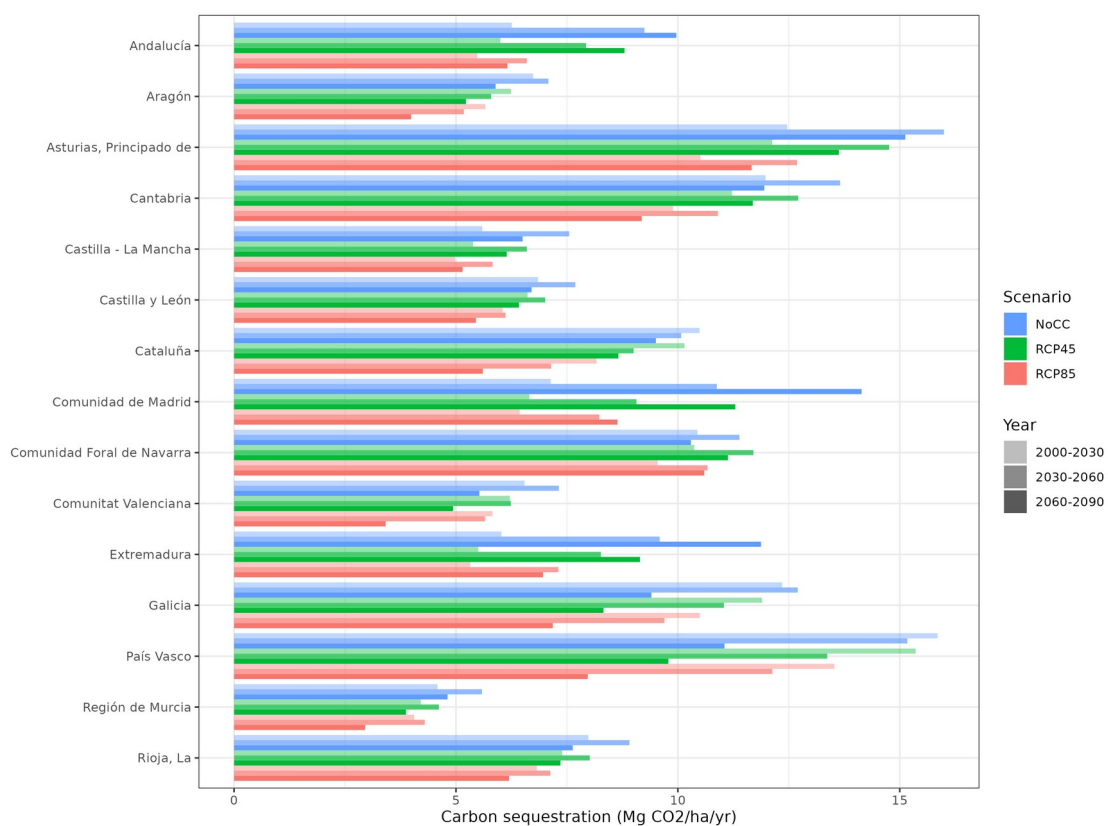


Fig. 4.4.6. Sumidero de carbono (toneladas de CO₂ por hectárea y año) medio en las distintas comunidades autónomas, bajo los tres escenarios climáticos y durante los periodos considerados.

5. GESTIÓN PARA LA ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

Los bosques son **sistemas adaptativos complejos** caracterizados por estar compuestos de múltiples elementos individuales que interactúan entre sí a distintas escalas espaciales y temporales, haciendo que emerjan propiedades que les otorgan una gran capacidad de autoorganización y adaptación al cambio (Messier y Puettmann, 2011; Puettmann, 2011). Sin embargo, la capacidad de adaptación de los bosques a cambios en el ambiente depende de la escala temporal. El tiempo requerido para adaptarse a los cambios climáticos no se corresponde necesariamente con la velocidad en que los cambios se producen, por lo que puede verse comprometida su capacidad de adaptación a corto plazo y resultar insuficiente para cumplir con los objetivos y **necesidades de mitigación y adaptación** de nuestra sociedad actual (Spittlehouse, 2005; Vericat et al., 2012).

La **gestión forestal** constituye una herramienta de gran potencial para acelerar la adaptación de los bosques al cambio climático y fomentar su papel de mitigación, entre otros servicios ecosistémicos forestales. Además, gracias a la gestión puede favorecerse el almacenamiento de mayores cantidades de carbono. Entre los potenciales objetivos de la gestión forestal se encuentran: a) el incremento de las tasas de crecimiento, b) la disminución de la mortalidad, c) la mejora de la salud o vitalidad de la masa, d) la mejora de la provisión de productos forestales y e) la disminución de la vulnerabilidad al fuego, sequías u otros eventos extremos. Por tanto, la gestión forestal es esencial para hacer frente al cambio global (Ruiz-Peinado et al., 2017). En concreto, la **gestión forestal adaptativa** propone un modelo de gestión en el que los planes se van revisando y reajustando de acuerdo con la evolución del cambio climático y del estudio de la respuesta de los ecosistemas a las intervenciones o actuaciones de gestión pertinentes (Bravo-Oviedo et al., 2008).

5.1 Objetivos y metodología de análisis

El objetivo de esta sección es recopilar un conjunto de **recomendaciones de gestión forestal** para dar respuesta a las problemáticas más frecuentes identificadas en las masas forestales mediterráneas y de acuerdo con unos objetivos de mejora de su capacidad de adaptación y mitigación al cambio climático. Cabe destacar que la heterogeneidad de formas y estructuras para una misma especie es muy alta. Las recomendaciones de gestión solo pueden hacerse realizando un diagnóstico previo del rodal a tratar, considerando su localización, contexto socioeconómico, fisiografía, estado sanitario y de desarrollo, edad, temperamento de la especie(s) y condiciones ecológicas entre otros (Serrada et al., 2011), así como teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad o viabilidad técnica y económica.

Por otra parte, numerosas actuaciones de gestión forestal benefician a tanto a la mitigación como a la adaptación (Vericat et al., 2012); por ejemplo, la mejora de la vitalidad forestal. Sin embargo, también existen incompatibilidades entre medidas de adaptación y mitigación a corto plazo como la maximización de stocks frente a la aplicación de claras (Vilà-Cabrera et al. 2018; Calama, 2017). En el conjunto de medidas propuestas no se distingue entre medidas de mitigación y adaptación ya que su contribución en la mitigación y/o adaptación depende de la escala temporal que se considere. En general, todas las medidas están encaminadas a mejorar la capacidad de sumideros a largo plazo.

Para lograr este objetivo hemos llevado a cabo un análisis exhaustivo de **documentación técnica** de distinta índole (criterios de gestión, buenas prácticas, recomendaciones, etc.) relacionada con la silvicultura y la gestión forestal en rodales mediterráneos (España, Italia, Portugal) en donde se plantean modelos de gestión forestal o de tratamientos sobre las masas como herramienta de adaptación de los bosques al cambio climático en el contexto mediterráneo. En concreto, se ha realizado una búsqueda general de proyectos LIFE e informes técnicos auspiciados por el ministerio de Transición Ecológica. Para los proyectos LIFE se ha realizado una búsqueda en la base de datos LIFE-EU¹ empleando “forest management” y “natural resources and ecosystems” como palabras clave de las que se seleccionaron los proyectos indicados en la Tabla. 5.1.1. También se estudiaron las buenas prácticas propuestas para áreas protegidas en el manual #13 editado por EUROPARC².

En la siguiente Tabla 5.1.1 se presentan las recomendaciones encontradas, agrupadas por género y/o especie y región.

¹ [LIFE 3.0 - LIFE Project Public Page \(europa.eu\)](https://l3o.europecooperation.org/)

² [Buenas prácticas de gestión forestal - Wiki de EUROPARC España \(wikiredeuroparc.org\)](https://www.wiki-europarc.org/)

Tabla 5.1.1. Medidas selvícolas de mitigación o adaptación al cambio climático agrupados por especies principales o formación.

Formación y especies principales	Región de aplicación	Problemas detectados	Objetivos	Medidas	Ejemplo o fuente
Dehesas (sistemas agroforestales) <i>Quercus ilex</i> , <i>Quercus suber</i>	Alentejo (Portugal) Andalucía y Extremadura	Debilitamiento de masas y mortalidad de árboles	Reducir vulnerabilidad arbolado Promover vitalidad arbolado Diversificar especies	Conservar el matorral natural Plantar o sembrar en lugares protegidos	LIFE Montado Adapt (ADPM, 2022)
		Dificultades de regeneración por efecto del ramoneo	Regenerar arbolado	Uso de semillas locales y/o adaptadas Protección de plántulas Reducción de la presión del ganado o acotado al pastoreo	
		Pérdida fertilidad suelo Desertificación Aridez	Mejorar la eficiencia en el uso del agua y calidad suelo	Técnicas de retención de agua (p. ej. subsolado, acaballonado con desfonde)	
Otras formaciones de quercíneas <i>Quercus ilex</i> , <i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Quercus faginea</i>	Mediterránea	Reducción del crecimiento Elevada competencia Vitalidad reducida	Mejorar la vitalidad Modificar o diversificar estructura	Transformación de monte bajo a monte alto (resalveo de conversión) o transformación a monte medio regular (plan de ressalveo) Claras	(Vericat et al. 2012) (Bravo-Fernández et al., 2008)
		Problemas de regeneración	Favorecer la regeneración natural por semilla Adaptar las reforestaciones a escenarios de cambio global Restaurar áreas degradadas	Alargar periodos regeneración Siembras y klareos Seleccionar especies y/o genotipos adaptados Técnicas preparación suelo (p.ej. ahoyados, banquetas)	
		Vulnerabilidad a grandes incendios	Reducir la continuidad vertical y cantidad de combustible	Claras Resalveos Desbroces selectivos Podas Fuego prescrito	
		Vulnerabilidad al cambio climático	Fomentar la heterogeneidad Fomentar las masas mixtas y sotobosque diversificado	Regular la proporción de especies Siembra o plantación Eliminación de especies no deseadas	

			Mantener rodales de interés		
		Aumento plagas y enfermedades	Facilitar la adaptación genética "in situ": Mantener heterogeneidad	Mantener diferentes morfotipos (tipo morfológico) mediante cortas selectivas	
Rebollares <i>Quercus pyrenaica</i>	Sierra del Moncayo, Aragón	Estancamiento evolutivo Individuos puntisecos Falta de vigor	Mejorar el vigor de la masa Disminuir el riesgo de incendios Mejorar la resiliencia Favorecer la diversidad específica	Resalveo de conversión a monte alto Claras Resalveo de conversión a monte medio regular Entrada de ganado Trituración residuos	EUROPARC
Robledales <i>Quercus pubescens (humilis)</i>	Prepirineo de Lleida, Cataluña	Densidad excesiva, copas poco desarrolladas, escasa fructificación	Mejorar la estructura Favorecer la diversidad específica	Resalveo de conversión a monte alto de peso moderado mediante selección de pies	EUROPARC
		Riesgo de incendio	Disminuir la cantidad de combustible	Desbroce selectivo de matorral Eliminación de restos por trituración	
Alcornocales <i>Quercus suber</i>	Cataluña	Falta de vitalidad	Mejorar la vitalidad Incrementar la producción corcho Favorecer regeneración	Entresaca de peso moderado Desbroces selectivos	Life Red Bosques EUROPARC
		Exposición a estrés hídrico y riesgo de incendios	Mejorar la resistencia a la sequía e incendios Mejorar la funcionalidad y resiliencia	Reducir la densidad de árboles pequeños Adehesamiento Tratamiento de los restos de las cortas	(Mundet et al. 2018)
Enebrales alta montaña <i>Juniperus spp.</i>	Sierra Nevada, Granada	Dificultades de regeneración natural	Asegurar la persistencia de la masa	Siembra y plantación Eliminación de especies oportunistas Empleo de especies facilitadoras Protección frente a la herbivoría	Life Adaptamed (Zamora et al., 2022)
Sabinares <i>Juniperus sabina</i>	Soria	Vulnerabilidad a incendios y sequía Aumento plagas y enfermedades.	Vitalizar las masas Mejorar la resistencia	Mantener estructura irregular mediante cortas de entresaca regularizada Desbroces selectivos	Life Soria

		Dificultades de regeneración natural	Favorecer regeneración natural	Entresaca	
Encinares, castaños, robledales, y pinares subhúmedos <i>Castanea sativa</i> , <i>Quercus spp.</i> (<i>Q. pubescens</i> , <i>Q. canariensis</i> , <i>Q. petraea</i> , <i>Q. robur</i> , <i>Quercus ilex</i>) <i>Pinus pinea</i> <i>Pinus sylvestris</i>	Mediterráneo subhúmedo catalán	Alta densidad Regeneración coetánea abundante	Vitalizar las masas	Entresaca Claras sistemáticas Cortas sanitarias	Life Mix for change
		Escasa estratificación y simplificación estructural	Multiestratificación Promover la heterogeneidad Facilitar implantación de especies esporádicas	Resalveo Recepeado	(Coello et al. 2022)
		Especies poco adaptadas	Favorecer sotobosque diverso	Desbroce selectivo parcial Plantación	
Hayedos <i>Fagus sylvatica</i>	Sicilia, Italia	Simplificación estructural Vulnerabilidad a incendios Deterioro de masas	Favorecer la mezcla de especies y la estabilidad hidrogeológica, Promover estructuras complejas	Conversión en monte alto Acotado de ganado para facilitar la regeneración Claras selectivas	Life Resil for med (Sferlazza et al., 2017)
		Degradación del suelo	Mejorar la calidad del suelo	Dejar restos de madera muerta en el suelo	
		Homogeneidad estructural Procesos de decadencia	Aumentar la heterogeneidad estructural	Clareos	Life Fagus (Barbati et al. S.F.)
Hayedos <i>Fagus sylvatica</i>	Soria	Aumento plagas y enfermedades Vulnerabilidad a incendios y sequías	Promover vitalidad	Entresaca por bosquetes o regularizada Desbroces selectivos Claras de moderadas a fuertes Revisión e incremento de turnos	LifeSoria Forestadapt
Masas mixtas <i>Quercus robur</i> o <i>Fagus sylvatica</i>	Burgos, Castilla y León	Densidad excesiva	Disminuir el riesgo de eventos renovadores no deseados Aumentar la diversidad	Claras Entresacas	EUROPARC
Mezcla coníferas y frondosas	Mediterránea	Proporciones no equilibradas o alteradas por	Diversificar la estructura y las especies	Claras por lo alto Claras selectivas	(Vericat et al 2012)

<i>Pinus spp.</i> y <i>Quercus spp.</i>		gestión histórica	Favorecer la presencia de <i>Quercus</i>	Abrir huecos o liberar competencia	
Pinares <i>Pinus halepensis</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Pinus pinaster</i> <i>Pinus pinea</i> <i>Pinus nigra</i> <i>Pinus radiata</i>	Mediterránea	Problemas de vitalidad	Mejorar la vitalidad y calidad final mediante reducción del volumen en pie	Claras Entresaca por bosquetes o por aclareo sucesivo uniforme Aumentar claras y reducir peso cortas finales Apertura gradual del dosel Clareos Claras de moderadas a fuertes	(García-Güemes & Calama, 2015) (EUROPARC, 2017)
		Aumento de procesos de decaimiento y mortalidad			(Serrada et al. 2011)
		Homogeneidad estructural (p. ej. monoespecíficos coetáneos)	Aumentar la heterogeneidad espacial y estructural Promoción masas mixtas Favorecer a presencia de otras especies	Resalveo de especies de <i>Quercus</i> Plantaciones de diversificación Clareos precoces Abrir huecos o liberar competencia	(Navarro-Cerrillo et al. 2022)
		Problemas de regeneración	Favorecer regeneración natural Proteger regenerado Irregularizar la masa Promover masas mixtas Diversificación específica y estructural	Mantener matorral espinoso de protección Eliminación selectiva de matorral Cortas graduales de liberación Evitar cortas a hecho Alargamiento y flexibilización de los turnos de corta	LifeSoria Forestadapt
		Alta densidad Mayor incidencia plagas	Reducir las densidades	Aumentar el peso de las claras	
		Incremento de perturbaciones abióticas	Aumentar la estabilidad de la masa	Claras Clareos precoces Limpias regenerado post incendios Desbroces selectivos	
Eucaliptales <i>Eucalyptus spp.</i>	Galicia	Degradación Baja productividad Abandono Vulnerabilidad a incendios	Favorecer la regeneración natural Modificar la especie principal	Repoblaciones Transformación a pinar (<i>Pinus pinaster</i>)	(Xunta de Galicia, 2021)

5.2 Análisis y síntesis de los resultados

Como resultado del análisis bibliográfico, hemos identificado un conjunto de **problemas generales** en los bosques mediterráneos debido al cambio climático (Herrero & Zavala, 2015; García-Güemes & Calama, 2015; Calama, 2017; Coello et al., 2022):

- Procesos de extinción y sustitución de especies.
- Aumento de procesos de decaimiento forestal asociados a factores abióticos como eventos extremos (p. ej. reducción del crecimiento, mortalidad por eventos de sequía).
- Exposición a perturbaciones nuevas o de mayor intensidad (p. ej. grandes incendios).
- Cambios en la productividad primaria neta y en la provisión de servicios ecosistémicos.
- Dificultades de la regeneración. (p. ej. la aridez reduce la tasa de supervivencia, crecimiento o reclutamiento, sobre todo en bosques muy densos).
- Problemas sanitarios por mayor incidencia de plagas forestales y enfermedades (p. ej. el incremento de las temperaturas favorece la proliferación de hongos patógenos o una mayor incidencia de plagas como la procesionaria).
- Cambios fenológicos (p. ej. alargamiento del periodo vegetativo o adelanto de la floración y fructificación).

Por otra parte, las **medidas de selvicultura adaptativa** comúnmente propuestas para abordar varios de estos problemas (Coello et al., 2012; Vericat et al., 2012, García-Güemes & Calama, 2015; Vila-Cabrera et al., 2018) persiguen los siguientes objetivos:

- Promover la vitalidad de la masa y el vigor y resistencia individual (p. ej. disminuyendo la densidad y haciendo una selección pie a pie de individuos sanos).
- Mantener y promover la diversidad de especies (p. ej. favoreciendo la presencia y desarrollo de especies secundarias del sotobosque).
- Promover la heterogeneidad estructural a escala de rodal, incluyendo árboles muertos.
- Promover o facilitar la regeneración natural por semilla (p. ej. mediante apertura de claros o mediante cortas de regeneración).
- Favorecer la protección del suelo.
- Reducir la vulnerabilidad a incendios y fomentar la resiliencia natural de las formaciones (p. ej. modificando la continuidad vertical y cantidad de combustible).
- Promover cambios naturales de estructura o composición (p. ej. impulsando la transformación de monte bajo a monte alto; promoviendo cambios de masas monoespecíficas a masas mixtas).
- Flexibilizar y diversificar las prácticas o tratamientos habituales.
- Promover la heterogeneidad espacial a escala de paisaje.

Buena parte de las masas forestales españolas son actualmente gestionadas bajo una **estructura** de masa **regular**, especialmente en el caso de los pinos, pero también en otras especies (Vadell et al. 2022). Sin embargo, considerando objetivos como la protección del suelo, la biodiversidad o los productos forestales no madereros, llevar las masas forestales hacia estructuras más **heterogéneas** (p. ej. irregulares) puede ser beneficioso en algunos casos (Pukkala, 2011). Las masas heterogéneas e irregulares se asemejan más a las naturales y cuentan con cobertura vegetal de manera permanente, lo que favorece la protección del suelo (Jonard et al., 2017). De hecho, estudios a largo plazo experimentales y de modelización demuestran que los bosques irregulares presentan mayores

stocks de carbono (Ruiz-Peinado et al., 2017). Sin embargo, la estructura más adecuada dependerá del objetivo, contexto ecológico, condicionantes socioeconómico y/o las amenazas presentes.

Por otra parte, las **masas forestales mixtas** presentan en general mayor productividad y estabilidad en el crecimiento, mayor resistencia y resiliencia frente a perturbaciones bióticas y abióticas (cuando las especies tienen distintos rasgos funcionales), mayor multifuncionalidad y, por consiguiente, mayor potencial para proveer de servicios ecosistémicos (Coello et al., 2022). Por tanto, promover este tipo de masas es también beneficioso para la adaptación al cambio climático.

Además, hay tres elementos de interés en lo que respecta a la **planificación de la gestión**. En primer lugar, parece adecuado plantear modelos de gestión **multifuncional**, que consideren un conjunto de servicios ecosistémicos y fomenten la puesta en valor de productos forestales no maderables, objetivos de conservación de la biodiversidad, así como de uso social o recreativo (Piqué, 2015; Larsen et al., 2022). En segundo lugar, cabe destacar el importante papel de los **rodiles maduros** en términos de captura de carbono acumulado debido a la compleja estructura vertical, la combinación de especies que optimizan la obtención de recursos (Stephenson, 2014) y la capacidad de mantener la tasa de secuestro de carbono del suelo a largo plazo (Harmon, 2009). Además, se trata de rodales resilientes por presentar elevada diversidad estructural y funcional y por ser un reservorio de especies. En muchos casos, estos rodales se encuentran en zonas o cuarteles de reserva que no han tenido gestión de aprovechamiento durante varias décadas (Larsen et al., 2022; EUROPARC, 2020; FUNGOBE, 2022). Por último, la planificación a **escala de paisaje** (p. ej. mosaico interconectado de rodales en distintas fases de maduración) promueve la resiliencia y conservación de las masas al facilitar la conectividad de procesos ecológicos tales como la dispersión natural de semillas, la regeneración natural, los flujos de materia y energía (carbono, agua, semillas) y el movimiento de las especies forestales entre otros procesos (EUROPARC, 2017 & 2020; Tíscar et al., 2015).

En definitiva, la gestión forestal puede incidir en la **capacidad de los bosques de almacenar carbono**, y en su **resiliencia y resistencia** frente a los efectos del cambio climático. Sin embargo, la gran diversidad de especies, estructuras, estados sanitarios y contextos ecológicos y socioeconómicos existentes en España hace que el abanico de estrategias y medidas posibles sea muy variado. Resulta esencial por tanto realizar un buen diagnóstico y caracterizar los problemas más relevantes para poder plantear objetivos y medidas de gestión eficaces. En líneas generales, la transición hacia masas mixtas e irregulares facilitará desarrollar una gestión forestal “climáticamente inteligente” que contribuya a la mitigación y adaptación al cambio global (Vadell et al., 2022).

Para asegurar que las medidas son efectivas y se mantienen en el tiempo es aconsejable realizar un seguimiento y revisión de las actuaciones, tal como se plantea en la gestión adaptativa. Una buena herramienta para poder llevar a cabo este seguimiento es la **certificación forestal**. La certificación de la gestión forestal sostenible garantiza que los bosques se gestionan conforme a unos requisitos ambientales, sociales y económicos (PEFC, s.f.). En este sentido, organizaciones como FSC, están desarrollando herramientas para ayudar a los propietarios de los terrenos forestales a hacer un seguimiento de las masas forestales y a realizar actuaciones para la adaptación al cambio climático. (ADAPTECCA, s.f.) Además, el procedimiento de certificación forestal permite a los consumidores disponer de información y garantías sobre el origen sostenible de los productos.

6. DISCUSIÓN

6.1 Sumidero de carbono en los bosques españoles y efectos del cambio climático

Los resultados del presente estudio indican que los bosques españoles una **capacidad de sumidero de carbono sostenida** a lo largo de todo el período simulado **bajo un escenario sin cambio climático y sin considerar perturbaciones naturales o antrópicas**. Esto se refleja en las estimaciones obtenidas, que indican el mantenimiento del crecimiento de las masas y un consecuente incremento en los stocks de carbono y madera estructural y leñas. Dicho potencial de acumulación de carbono es mayor en áreas dominadas por especies de crecimiento rápido, principalmente del noroeste peninsular (Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco y Navarra). Nuestros resultados también indican que el **cambio climático esperado tenderá a reducir las tasas de crecimiento** de muchas especies y, notablemente, aquellas más productivas como el castaño o las especies de plantaciones. Otras especies, como los robles, encinas o el pino carrasco, se verían menos o poco afectadas y contribuyen a un mantenimiento sostenido de la función de sumidero, aunque su crecimiento es más lento. En concreto, hemos observado que **un escenario de cambio climático severo (RCP 8.5)** reduciría en **un 21% los stocks de carbono** en pie y **un 29% la capacidad de sumidero** de los bosques, respecto a un escenario sin cambio climático (Fig. 6.1.1).

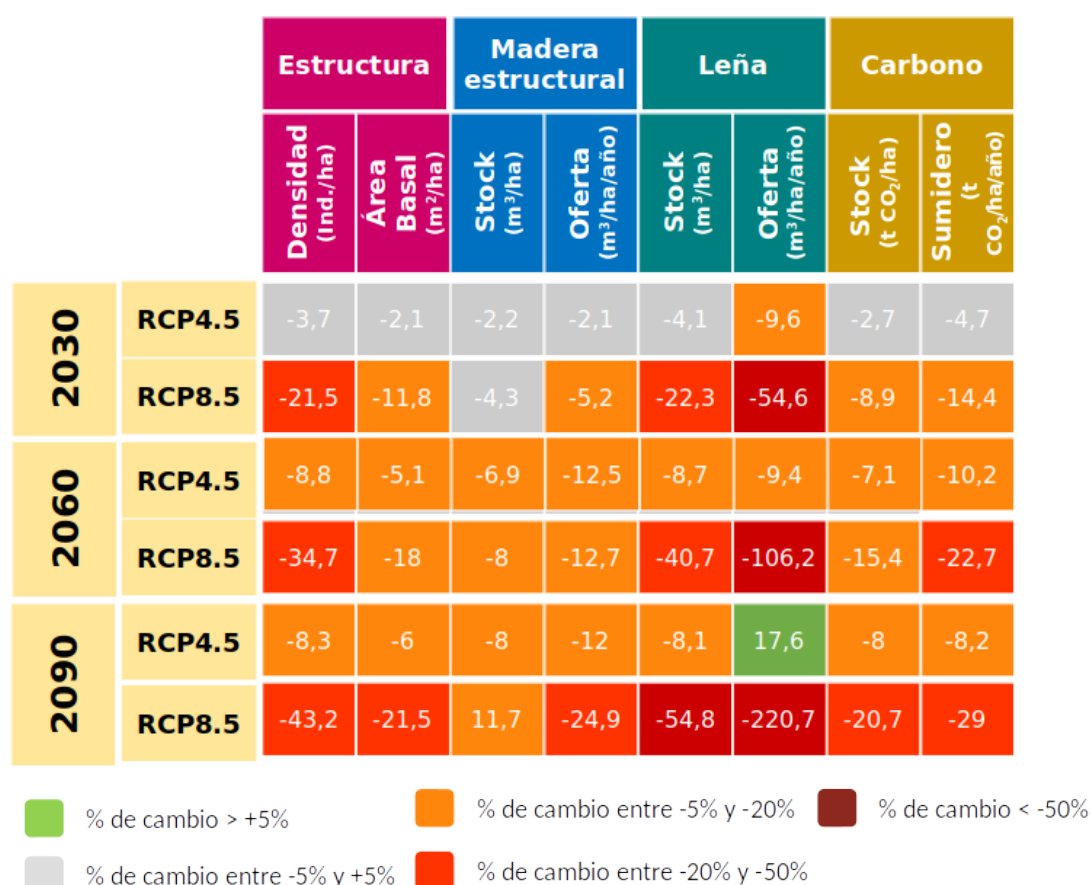


Fig. 6.1.1. Resumen del porcentaje de variación de indicadores estructurales y la provisión de distintos servicios ecosistémicos para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a los valores del escenario de clima constante para el mismo periodo/año.

Es importante resaltar las **limitaciones** del estudio en cuanto a la **no inclusión de perturbaciones naturales** como incendios forestales, plagas o sequías extremas. Dado el paso temporal de 10 años del modelo empleado, algunas de dichas perturbaciones son difíciles de acomodar en la aproximación de modelado empleada que, sin embargo, es bastante robusta respecto al crecimiento del bosque respecto a las condiciones climáticas generales. La inclusión explícita de perturbaciones naturales tenderá en la mayoría de los casos a **disminuir la capacidad de sumidero** de los bosques, debido al retorno del carbono a la atmósfera por procesos de descomposición de la materia muerta generada en el caso de plagas o sequías, o por combustión en el caso de los incendios. Por lo tanto, es esperable que las tasas de sumidero observadas en futuros inventarios forestales sean inferiores a las aquí reportadas, independientemente de los cambios en el clima. Asimismo, es importante resaltar que se esperan incrementos en la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos, haciendo aún más importante su consideración explícita en estudios de modelado. Por otro lado, ya se ha mencionado la necesidad de **incluir los efectos de la gestión forestal** en las simulaciones. Esta necesidad se sustenta en que la gestión forestal suele tener una influencia mayor en la dinámica del bosque, y los servicios asociados, que el propio cambio climático o las perturbaciones naturales (Roces-Díaz et al. 2021). También se ha comentado en los resultados el posible sesgo de no considerar la vida útil de los productos resultantes en la evaluación de la función de sumidero de plantaciones o bosques dominados por especies altamente productivas. El efecto positivo o negativo de la gestión sobre el sumidero de carbono dependerá de la vida útil de los productos generados. Asumiendo la ausencia de perturbaciones naturales y que una parte importante de productos en la actualidad tienen una duración corta (Vadell et al. 2022), los resultados numéricos preliminares de este informe deberían considerarse mayormente como **potenciales máximos** de acumulación de biomasa y tasas de sumidero.

6.2 Reflexiones sobre el modelado de la gestión forestal

Hemos resaltado en varias ocasiones la importancia de incluir la gestión forestal en el estudio del impacto del cambio climático sobre el balance de carbono de los bosques. Quisiéramos terminar esta discusión con algunas reflexiones respecto a lo que ello supone.

El modelado de los efectos de **la gestión forestal a escala de rodal** es factible siempre que sea posible traducir las directrices de silvicultura a parámetros del modelo de simulación. En este sentido, no todas las prácticas de gestión recomendadas para la adaptación y mitigación son fáciles de implementar en un modelo de dinámica forestal. Por ejemplo, tratamientos como siembras, cortas, clareos, entresacas o resalveos se pueden simular en modelos que tengan suficiente detalle en la descripción de la estructura del componente arbóreo de los bosques. En cambio, para evaluar el efecto de tratamientos como los desbroces, podas o las quemas prescritas se requiere el uso de modelos que incluyan los elementos afectados en su representación de la estructura de la vegetación, como sería un mayor detalle en la estructura del árbol o la representación del matorral. Entre las actuaciones más difíciles de representar en el modelado estarían aquellas que requieren la simulación de procesos bióticos o abióticos adicionales, como el efecto de la herbivoría para tratamientos de protección de plántulas o de exclusión de ganado, los procesos hidrológicos para las técnicas de mejora de la retención de agua o los procesos de descomposición para los tratamientos de los restos de cortas.

En comparación con la simulación a escala de rodal, la modelización de **la gestión forestal a escala de paisaje o regional** se vuelve una tarea bastante más compleja debido a la cantidad de factores que intervienen, incluyendo la diversidad de formaciones boscosas, las distintas perspectivas o necesidades que pueden tener los propietarios (públicos o privados), los intereses económicos, la demanda de productos forestales en los mercados, los valores de conservación o las normativas legales de aplicación. Debido a toda esta incertidumbre, este tipo de modelado suele realizarse mediante la evaluación de **escenarios de gestión**, análogos a los escenarios climáticos. Los escenarios de gestión requieren una narrativa plausible que describa el contexto económico, político y social de las prácticas de gestión cuyos efectos se pretende evaluar. Esa narrativa se traduce luego en decisiones de modelado a distintas escalas, como serían la demanda de productos de madera de determinada especie y diámetros, la restricción de la gestión a determinadas áreas o el modelo selvícola a aplicar para las distintas formaciones existentes. Los escenarios de gestión a evaluar en el contexto peninsular deberían incluir no solamente aquellos que evalúen las medidas de adaptación y mitigación sintetizadas en este informe, sino un conjunto de distintas alternativas plausibles cada una con su narrativa, empezando por la intensidad y las prácticas de gestión empleadas en el contexto actual, que varían mucho dependiendo de la comunidad autónoma. Trabajar con distintos escenarios de gestión, en combinación con escenarios climáticos, permitiría ver cómo estas alternativas plausibles se traducen en impactos en la dinámica forestal y los servicios ecosistémicos asociados. Si el foco está puesto en la función de sumidero de carbono la evaluación de dicho servicio deberá incluir los productos derivados de la madera generados en cada escenario y tomar en consideración su tiempo de vida medio antes de que se produzca un retorno de carbono a la atmósfera.

7. CONCLUSIONES

En este estudio hemos utilizado un modelo de simulación forestal para proyectar los cambios futuros en el stock y el sumidero de carbono de los bosques españoles hasta finales del siglo XXI bajo distintos escenarios climáticos. Las conclusiones principales de nuestro estudio han sido:

- En un contexto **sin cambio climático**, y en ausencia de perturbaciones naturales o antrópicas, los bosques españoles podrían tener una **capacidad de sumidero de carbono sostenida** a lo largo de todo el s. XXI.
- Sin embargo, un escenario de **cambio climático severo reduciría** en un **21% los stocks** de carbono en pie y un **29% la capacidad de sumidero** de los bosques españoles, respecto a un escenario sin cambio climático.
- Los efectos negativos del cambio climático en la capacidad de sumidero podrían ser mayores si se incluyeran **perturbaciones naturales** (sequías, plagas e incendios forestales) en las simulaciones, ya que en la mayoría de los casos tenderían a **disminuir la capacidad de sumidero**, aun más si se toma en consideración el probable incremento de dichas perturbaciones en el futuro.
- Una gestión forestal orientada a la mitigación y adaptación puede incidir en la **capacidad de los bosques de almacenar carbono**, y en su **resiliencia y resistencia** frente a los efectos del cambio climático. Sin embargo, la gran diversidad de especies, estructuras, estados sanitarios y contextos ecológicos y socioeconómicos existentes en España hace que el abanico de estrategias y medidas posibles sea muy variado.
- Para una estimación más precisa de los cambios futuros en el stock de carbono y la capacidad de sumidero de los bosques españoles sería necesario incluir los efectos de perturbaciones naturales (sequías extremas o incendios) y distintos **escenarios de gestión forestal** alternativos, asociados a distintos contextos socio-económicos y legislativos.

8. REFERENCIAS

ADPM, "Associação de Defesa do Património de Mértola". (2022). Manual para la adaptación de las dehesas al cambio climático. ADPM, Mértola.

Barbati, A.; Burrascano, S.; De Paulis, S.; De Vita, A.; Di Santo, D. Gioiosa, M.; Mattioli, W.; Sabatini, F.M. (S.F.) Fagus Life+ project for the enhancement of structural heterogeneity in priority habitat (9210* and 9220*) Apennine beech forests. [Poster] Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/platform/documents/mediterranean_old_forests/posters/posterlife_fagus_d_di_santo_en.pdf [Última consulta 23/01/2023]

Berg, P.; Photiadou, C.; Simonsson, L.; Sjökvist, E.; Thuresson, J.; and Mook, R.; (2021). Temperature and precipitation climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from European climate projections, version 1, (for [extracted period], [extracted domain], [model], [experiment], [ensemble member], etc.). Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.9eed87d5

Blate, G.M.; Joyce, L.A.; Littell, J.S.; McNulty, S.G.; Millar, C.I.; Moser, S.C.; Neilson, R.P.; O'Halloran, K.; Peterson, D.L., Geoffrey M., (2009). Adapting to climate change in United States National forests. *Unsaylva* 60 (231/232): 57-62

Bravo, F.; Guijarro, M.; Cámara, A.; Díaz Balteiro, L.; Fernández, P.; Pajares, J.A.; Pemán, J.; RuizPeinado, R. (2017). La situación de los bosques y el sector forestal en España – ISFE 2017. Disponible en: http://secforestales.org/sites/default/files/archivos/isfe2017_final-v2.pdf [Última consulta 25/01/2023]

Bravo-Fernández, J.A.; Roig, S.; Serrada; R. (2008). Selvicultura de montes bajos y medios de *Quercus ilex* L., *Q. pyrenaica* Willd. y *Q. faginea* Lam. En: Serrada,R.; Montero, G.; Reque, J. (Eds). *Compendio de Selvicultura aplicada en España*. INIA-Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid, pp: 657-744.

Bravo-Oviedo, F.; Bravo-Oviedo; A., Ruiz-Peinado; R., Montero González; G. (2008). Selvicultura y cambio climático. En: Serrada R, Montero G, Reque J (Eds). *Compendio de Selvicultura aplicada en España*. INIA-Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.

Calama Sainz, R. (2017). La gestión forestal como herramienta para la adaptación al cambio climático: ¿realidad o ficción científica? *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 43. 59-90p.

Coello, J.; Piqué, M.; Beltrán, M.; Coll, L.; Palero, N.; Guitart, L. (2022). Gestión adaptativa y naturalística en bosques mixtos mediterráneos subhúmedos: encinares, castañares, robledales y pinares. Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, Solsona (Lleida); Centre de la Propietat Forestal, Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona). 104 p.

CCSP [Climate Change Science Program], (2008). Preliminary review of adaptation options for climate-sensitive ecosystems and resources. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. [Julius, S. H., J. M. West (eds.), J. S.

Baron, B. Griffith, L. A. Joyce, P. Kareiva, B. D. Keller, M. A. Palmer, C. H. Peterson, and J. M. Scott (Authors)]. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. 873 p.

Diéguez-Aranda, U.; Rojo Alboreca, A.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez González, J. G.; Barrio-Anta, M.; Crecente-Campo, F.; González González, J. M.; Pérez-Cruzado, C.; Rodríguez Soalleiro, R.; López-Sánchez, C. A.; Balboa-Murias, M. Á.; Gorgoso Varela, J. J. & Sánchez Rodríguez, F. (2009). Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia.

Dixon G (2013). Essential FVS: A User's Guide to the Forest Vegetation Simulator. Fort Collins, Colorado.

EUROPARC-España. (2020). Bosques maduros mediterráneos: características y criterios de gestión en áreas protegidas. Ed. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid.

EUROPARC-España. (2017). Las áreas protegidas en el contexto del cambio global: incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión Ed. Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales. Madrid.

FAO. (2010): Managing forests for climate change. FAO, Roma. 20 p.

FUNGOBE. (2022). Los bosques maduros en la mitigación y la adaptación al cambio climático. [Borrador] Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid.

FUNGOBE. (2022). La adaptación de los bosques frente al cambio climático. Preguntas frecuentes. Proyecto LIFE RedBosques_Clima. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid.

García-Güemes, C. & Calama, R. (2015): La práctica de la silvicultura para la adaptación al cambio climático. En: Herrero, A. & Zavala, M.A. editores. (2015) *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

González Díaz, P.; Ruiz Benito, P.; Astigarraga Urcelay, J.; Cruz Alonso, V.; Moreno Fernández, D.; Herrero Méndez, A.; Gosálbez Ruiz, J. de Zavala Gironés MA, (2020). *Los bosques españoles como soluciones naturales frente al cambio climático: herramientas de análisis y modelización*. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

Harmon, M.E. 2009. Woody Detritus Mass and its Contribution to Carbon Dynamics of Old-Growth Forests: The Temporal Context. In: Wirth Christian et al, ed. Old-Growth Forests. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; Berlin. DOI:10.1007/978

Helms, J. A. (1998). The dictionary of forestry. The Society of American Foresters, Bethesda, MD. 210 p.

Herrera, S., Fernández, J., & Gutiérrez, J. M. (2016). Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. International Journal of Climatology, 36(2), 900-908.

Herrero, A. & Zavala, M.A., editores (2015). Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

Hynynen, J.; Ojansuu, R.; Hökkä, H.; Siipilehto, J.; Salminen, H. Haapala., P. (2002) Models in MELA system. Finnish Forest Research Institute. Research papers no. 835. 1-116. Vantaa, Finland

Ibáñez, J.J.; Vayreda, J.; Gracia, C. (2002) Metodología complementaria al Inventario Forestal Nacional en Catalunya. En: Bravo F.; del Río M.; del Peso C. (eds.) El inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la gestión forestal sostenible: 67-77. Fundación General de la Universidad de Valladolid

IPCC. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 986 p.

IPCC, (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al *Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs

Jonard, M.; Nicolas, M.; Coomes, D.A.; Caignet, I.; Saenger, A.; Ponette, Q. (2017) Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Sci. Total Environ*, 574, PP. 616-628. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.028>.

Larsen, J.B., Angelstam, P., Bauhus, J., Carvalho, J.F., Diaci, J., Dobrowolska, D., Gazda, A., Gustafsson, L., Krumm, F., Knoke, T., Konczal, A., Kuuluvainen, T., Mason, B., Motta, R., Pötzelsberger, E., Rigling, A., Schuck, A., (2022). Closer-to- Nature Forest Management. From Science to Policy 12. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs12>

Messier, C.; Puettmann, K. J. (2011). "Forests as complex adaptive systems: implications for forest management and modelling". *L'Italia Forestale e Montana*: 66 (3): 249-258.

Millar, C.I., Stephenson, N.L.; Stephens, S.L. (2007). Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2007, pp. 2145-2151

Montero, G.; Ruiz-Peinado, R.; Muñoz, M. (2005) Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie Forestal nº 13.

Mundet, R.; Baiges, T.; Beltrán, M.; Torrell, A. (2018). Guía de recomendaciones y medidas de adaptación al cambio climático en la gestión de *Quercus suber*. Proyecto Life+SUBER.

Navarro-Cerrillo, R.M.; Ruiz-Gómez, F.J.; Camarero, J.J.; Castillo, V.; Barberá, G.G.; Palacios-Rodríguez, G.; Navarro, F.B.; Blanco, J.A.; Imbert, J.B.; Cachinero-Vivar, A.M.; et al. (2022). Long-Term Carbon Sequestration in Pine Forests under Different Silvicultural and Climatic Regimes in Spain. *Forests*, 13, 450. <https://doi.org/10.3390/f13030450>

Piqué, M. (2015). Planificación forestal en espacios naturales protegidos: herramientas integradoras en un contexto de cambio. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 39: 299-312.

Puettmann, K. J. (2011). Silvicultural challenges and options in the context of global change: "simple" fixes and opportunities for new management approaches. *Journal of Forestry*, 109 (6): 321-331.

Pukkala, T.; Lähde, E.; Laiho, O.; Salo, K.; Hotanen, J.P. (2011) A multifunctional comparison of even-aged and uneven-aged forest management in a boreal region. *Canadian Journal of Forest Research*. 41(4): 851-862. <https://doi.org/10.1139/x11-009>

Roces-Díaz, J.-V.; Vayreda, J; De Cáceres, M; García-Valdés, R.; Banqué-Casanovas, M; Morán-Ordóñez, A; Brotons, L; De-Miguel, S; Martínez-Vilalta, J (2021). Temporal changes in Mediterranean forest ecosystem services are driven by stand development, rather than by climate-related disturbances. *Forest Ecology and Management* 480: 118623. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118623>.

Rodríguez de Prado, D., Vázquez Veloso, A., Quian, Y.F. et al. (2022) Can mixed forests sequester more CO₂ than pure forests in future climate scenarios? A case study of *Pinus sylvestris* combinations in Spain. *Eur J Forest Res*. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01507-y>

Ruiz-Peinado, R., M. Rio, M; Montero, G. (2011) New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish. *Forest Systems* 20:176–188.

Ruiz-Peinado, R.; Montero, G.; Del Rio, M. (2012) Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems* 21:42.

Ruiz-Peinado, R.; Bravo-Oviedo, A.; López-Senespleda, E.; Bravo, F.; & Del Río, M. (2017). Forest management and carbon sequestration in the Mediterranean region: A review. *Forest Systems*, 26(2), eR04S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11205>

Serrada, R.; Aroca, M. J.; Roig, S.; Bravo, A.; Gómez, V. (2011). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Notas sobre gestión adaptativa de las masas forestales ante el cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid. 128 p.

Serrada, R. (2011). Apuntes de silvicultura. Fundación Conde del Valle de Salazar, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Madrid. 502 pp.

Sferlazza, S.; La Mela Veca, D.S.; Miozzo, M.; Fantoni, I.; & Maetzke, F.G.; (2017). Linee guida per la valutazione della resilienza delle foreste mediterranee ai cambiamenti climatici. Palermo University Press, 128 pp.

Stephenson, N. L.; Das, A. J.; Condit, R.; Russo, S. E.; Baker, P. J. ; Beckman, N. G. ; Coomes, D. A. et al. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* 507: 90–93.

Tíscar, P.A.; García-Abril, A.D.; Aguilar, M.; Solís, A. (2015). Gestión Forestal Próxima a la Naturaleza: potencialidades y principios para su aplicación en los pinares de montaña mediterráneos como medida de adaptación al cambio climático. En: A. Herrero & MA Zavala, editores. (2015) *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

Trasobares, A.; Mola, B.; Aquilué, N.; González-Olabarria, J.R.; García-Gonzalo, J.; García-Valdés, R.; De Cáceres, M. (2022). Nationwide climate-sensitive models for stand dynamics and forest scenario simulation. *Forest Ecology and Management* 505: 119909

Vadell, E.; Pemán, J.; Verkerk, P.J.; Erdozain, M.; de-Miguel, S. (2022) Forest management practices in Spain: Understanding past trends to better face future challenges. *Forest Ecology and Management* 524: 120526.

Vericat, P.; Piqué, M.; Serrada, R. (2012). Gestión adaptativa al cambio global en masas de *Quercus mediterráneas*. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Solsona (Lleida). 172 p.

Vilà-Cabrera, A.; Coll, L.; Martínez-Vilalta, J.; Retana, J. Forest Management for Adaptation to Climate Change in the Mediterranean Basin: A Synthesis of Evidence. *For. Ecol. Manag.* 2018, 407, 16–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.021>

Spittlehouse, D.L. (2005) Integrating climate change adaptation into forest management. *Forestry chronicle* 81, 5, 691-695. doi: 10.5558/tfc81691-5

Xunta de Galicia. (2021). 1ª Revisión del plan forestal de Galicia hacia la neutralidad CARBÓNICA. Xunta de Galicia. Consellería do Medio Rural. Santiago de Compostela.

Zamora, R.; Barea-Azcón, J.M.; Pérez-Luque, A.J.; García, D.; Aspízua, R. y Cano-Manuel, F.J. (2022). Los enebrales de la alta montaña de Sierra Nevada: conservación y restauración. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (Junta de Andalucía)-Universidad de Granada. 89 pp.

Otros

Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. (BOE núm. 280, de 22 de noviembre de 200) Referencia: BOE-A-2003-21339

MITECO. 2022. Estrategia Forestal Española horizonte 2050. Aprobada en Consejo de ministros de 20 de diciembre de 2022.

Webgrafía

Sociedad Española de Ciencias Forestales. (s.f.). Glosario Técnico Forestal. Disponible en: http://secforestales.org/diccionario_forestal_secf [Última consulta 25/01/2023]

EUROPARC ESPAÑA. (s.f.) Experiencias de cambio climático. Disponible en: [Experiencias de cambio climático - Wiki de EUROPARC España \(wikiredeuroparc.org\)](https://www.europarc.es/experiencias-de-cambio-climatico) [Última consulta 25/01/2023]

Life Adaptamed. [Adaptamed - LIFE Adaptamed](https://www.lifeadaptamed.com/) [Última consulta 25/01/2023]

Life Mix for Change. <https://mixforchange.eu/language/es/> [Última consulta 25/01/2023]

Life Montado Adapt. [LIFEMONTADO-ADAPT \(lifemontadoadapt.com\)](https://lifemontadoadapt.com/) [Última consulta 25/01/2023]

Life Red Bosques Clima. [Inicio - REDBOSQUES CLIMA](https://redbosquesclima.com/) [Última consulta 25/01/2023]

Life Red Bosques. [Inicio - LIFE RedBosques](https://redbosques.com/) [Última consulta 25/01/2023]

Life Resil for Med . <http://www.resilformed.eu/en/> [Última consulta 25/01/2023]

Life Soria Forest Adapt. <https://www.soriaforestadapt.es/> [Última consulta 25/01/2023]

Catálogo de medidas de adaptación. (2021) Disponible en: https://www.soriaforestadapt.es/sites/default/files/documento/adjuntos/a4.1_catalogo_de_medidas_de_adaptacion_en.pdf [Última consulta 25/01/2023]

Plataforma sobre Adaptación al Cambio Climático en España (ADAPTECCA). (s.f.) *Adaptación al cambio climático a través de la certificación FSC*. Disponible en: <https://adaptecca.es/adaptacion-al-cambio-climatico-traves-de-la-certificacion-fsc> [Última consulta 11/04/2023]

PEFC. (s.f.) *¿Qué es la certificación forestal?* Disponible en: <https://www.pefc.es/que-hacemos/nuestro-enfoque/que-es-la-certificacion-forestal> [Última consulta 11/04/2023]

ANEXO A: TEORÍA DEL FPM

El modelo de proyección integral descrito en las Ecuaciones 1 y 2, aunque modificado, se ha utilizado para estudiar la dinámica de los pies mayores o árboles adultos (diámetro mayor de 7,5 cm) pero no la de los pies menores (diámetro menor de 7,5 cm). Para estos últimos se ha usado otra aproximación.

A.1 Pies mayores: Modelo Integral de Proyección modificado

Las características de muestreo de los Inventarios Forestales Nacionales, que incluye pies menores y la incorporación a las distintas subparcelas, nos han obligado a simplificar las Ecuaciones 1 y 2 de la sección 3.2. Por este motivo, el término de incorporación de árboles adultos se ha extraído de la integral y la Ecuación 1 modificada es ahora, para los árboles adultos:

(Ecuación 3)

$$N(y, t + \Delta) = N_{Adultos} + N_{Incorp}$$

donde:

(Ecuación 4)

$$N_{Adultos} = \int_{7,5}^{x_{max}} N(x, t) \cdot S(x) \cdot G(x, y) \cdot dx$$
$$N_{Incorp} = I \cdot \varphi(y)$$

Es decir, en las Ecuaciones 3 y 4 la división entre pies menores y árboles adultos se ha solucionado mediante la eliminación del término $F(x, y)$ de la integral de la Ecuación 2. En su lugar aparece ahora un nuevo término $I \cdot \varphi(y)$, pero fuera de la integral. Este término consta, por una parte, de una función I que calcula el número total de árboles incorporados a partir de una serie de variables predictivas, y por otra, de una función de densidad de probabilidad $\varphi(y)$ que distribuye esos árboles a lo largo de todos los posibles diámetros mayores que 7,5 cm. En la nueva Ecuación 3 la integral tiene un límite inferior que se corresponde con este valor. El límite superior, por otra parte, se determina a partir del diámetro máximo de la especie de árbol considerada. El nuevo término N_{Incorp} solo tiene en cuenta los pies incorporados, no los pies menores. Estos últimos se tratan ahora con un modelo adicional, como se explica más abajo en este mismo documento.

La integral de la Ecuación 4, en general, no se puede resolver de manera analítica y muchos autores optan por utilizar la regla de la cuadratura numérica del punto medio. En nuestro caso, hemos optado por implementar una cuadratura numérica basada en el algoritmo de Simpson extendido, que es más exacto.

A.2 Supervivencia

En el FPM hemos asumido una función logística para la probabilidad de supervivencia:

(Ecuación 5)

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-k_s}}$$

Hemos expresado el exponente k_s como una función lineal de las variables diámetro x , área basimétrica AB , precipitación P y temperatura T :

(Ecuación 6)

$$k_s = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot AB + a_3 \cdot P + a_4 \cdot T$$

La función $S(x)$ se determina con un algoritmo de regresión estadística generalizada binomial implementada en el paquete “stats” de R. Las anomalías climáticas no se incluyeron como variables predictivas en la determinación de la función de probabilidad de supervivencia debido a la escasez de datos de mortalidad para muchas especies, cosa que hacía difícil el cálculo de la regresión estadística correspondiente.

A.3 Crecimiento

El diámetro de un árbol en función del tiempo se ha asumido que puede expresarse como una función logística:

(Ecuación 7)

$$x = \frac{x_{max}}{1 + e^{-k_c \cdot t}}$$

Hemos seguido la misma notación x, y , que en párrafos anteriores. De la misma manera que en el caso de la supervivencia, el crecimiento depende de diversas variables a través de la constante k_c . Podemos verificar, de manera sencilla, que el diámetro máximo alcanzado por el árbol es, para $k_c \geq 0$:

(Ecuación 8)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{x_{max}}{1 + e^{-k_c \cdot t}} \approx x_{max}$$

La evaluación de la expresión logística de la Ecuación 7 requiere de la introducción de un valor para el tiempo t . Sin embargo, no siempre se conoce el valor exacto para cada individuo, lo que hace poco práctica la aplicación de la Ecuación 7. La solución que hemos aplicado se basa en deducir una

expresión para el crecimiento (siempre positivo) entre t y $t+\Delta$, es decir, $y-x$, que no dependa de t sino de Δ . Con un poco de álgebra podemos llegar a:

(Ecuación 9)

$$t = \frac{-1}{k_c} \cdot \ln\left(\frac{x_{max} - x}{x}\right)$$

$$t + \Delta = \frac{-1}{k_c} \cdot \ln\left(\frac{y_{max} - y}{y}\right)$$

Sabiendo que $y_{max} = x_{max}$ y agrupando términos obtenemos:

(Ecuación 10)

$$y - x = \frac{x_{max}}{1 + \left(\frac{x_{max}}{x} - 1\right) \cdot e^{-k_c \cdot \Delta}} - x$$

que ya no depende directamente de t sino de la diferencia temporal Δ . Finalmente, la condición de que el crecimiento sea siempre positivo se puede conseguir imponiendo $k_c \geq 0$, lo que nos lleva a sugerir otra expresión logística para k_c :

(Ecuación 11)

$$k_c = \frac{1}{1 + e^{-\xi}}$$

que garantiza que $k_c \geq 0$ siempre. El nuevo término ξ incluye una dependencia lineal en las variables predictivas climáticas mencionadas anteriormente:

(Ecuación 12)

$$\xi = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot AB + b_3 \cdot P + b_4 \cdot T + b_5 \cdot A_P + b_6 \cdot A_T$$

En esta ecuación el valor de los coeficientes se obtiene mediante una regresión no-lineal. Debido a la distribución aproximadamente log-normal de los residuos, se ha optado por una variable dependiente que es el logaritmo natural del incremento en diámetro, $\ln(y-x)$. El modelo de regresión es claramente no-lineal y es sensible a los valores iniciales, por lo que se ha optado por una implementación por pasos con algoritmos propios.

A.4 Incorporación

La incorporación de pies menores (diámetro menor de 7,5 cm) a la clase de árboles adultos (diámetro mayor de 7,5 cm) se trata de manera separada en el modelo. El algoritmo implementado consiste en la multiplicación de dos términos: el primero, I , determina el número esperado μ_I de

árboles incorporados a partir de una serie de variables predictivas y se modela mediante una regresión generalizada de Poisson con una función de enlace logarítmica:

(Ecuación 13)

$$\ln(\mu_I) = c_0 + c_1 \cdot n_{pm} + c_2 \cdot AB + c_3 \cdot P + c_4 \cdot T + c_5 \cdot A_p + c_6 \cdot A_T$$

En esta expresión, n_{pm} indica el número de pies menores en el paso temporal anterior.

El segundo término, $\varphi(y)$, describe la densidad de probabilidad de estos árboles incorporados en función de su diámetro ($y \geq 7,5$ cm siempre). Según nuestros cálculos, realizados a partir de los datos de los IFN, $\varphi(y)$ se puede aproximar por una densidad de probabilidad de una exponencial truncada:

(Ecuación 14)

$$\varphi(y) = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot y}}{e^{-\lambda \cdot 7,5}}$$

donde el parámetro λ se calcula de manera independiente para cada especie. La función I se ha determinado con funciones del paquete “stats” de R, mientras que $y\varphi(y)$ se ha calculado con un algoritmo propio.

A.5 Pies menores

La determinación del reclutamiento de nuevos pies menores en cada parcela de los IFN y para cada especie no se puede modelar de una manera sencilla, dado que en los IFN los pies menores dentro de cada parcela no se han medido individualmente, como sí se ha hecho con los árboles adultos. Además, hay un gran número de parcelas donde no hay pies menores de muchas especies. Estos datos, por tanto, se tienen que modelar teniendo en cuenta el gran número de ceros, así como el hecho de que solo conocemos el número de pies menores en conjunto para cada parcela. Por todo ello, hemos optado por una regresión de dos componentes de Poisson cero-inflada, tal que la parte cero-inflada, modelada mediante una regresión binomial, se encarga de explicar la existencia o no de pies menores:

(Ecuación 15)

$$P_{cero} = \pi + (1 - \pi) \cdot e^{-\lambda_{pm}}$$

Por otra parte, el componente de Poisson tiene en cuenta el número de pies menores:

(Ecuación 16)

$$P_{pois} = (1 - \pi) \cdot \frac{\lambda_{pm}^{n_{pm}} \cdot e^{-\lambda_{pm}}}{n_{pm}!}$$

En estas fórmulas, π es la probabilidad de ceros extra, n_{pm} es el número de pies menores observados y λ_{pm} es el número esperado de pies menores. Nuestra modelización en función de variables predictivas sigue la estrategia mostrada anteriormente. Mediante una función enlace logarítmica, tendremos:

(Ecuación 17)

$$\ln(\lambda_{pm}) = d_0 + d_1 \cdot n_{pm} + d_2 \cdot AB + d_3 \cdot P + d_4 \cdot T + d_5 \cdot A_p + d_6 \cdot A_T$$

Matemáticamente, la formulación de una regresión Poisson cero-inflada es más complicada que la de otros modelos de recuento. En el caso de los modelos que hemos utilizado, hemos implementado un algoritmo de regresión de Poisson cero-inflada del paquete “pscl” del software R.

ANEXO B: GLOSARIO

- **Aclareo sucesivo uniforme:** Las cortas por aclareo sucesivo uniforme son cortas continuas que dan lugar a masas regulares, consistentes en la extracción total de los pies de la masa principal de una forma paulatina y en un período de tiempo que no supere la duración de una clase artificial de edad (Serrada, 2011).
- **Adaptación:** Ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos o a sus efectos, que modera el daño o aprovecha las oportunidades beneficiosas (IPCC, 2007). Incluye actuaciones encaminadas a minimizar los potenciales efectos negativos del cambio climático sobre los sistemas, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la capacidad de resistencia y resiliencia de estos frente a las condiciones cambiantes (IPCC, 2014). Puede ser reactiva, cuando la intervención se realiza tras el impacto, o planificada, cuando implica una definición de actuaciones considerando los efectos del cambio aún no acontecidos sobre el sistema y su incertidumbre. La adaptación planificada conlleva actuaciones anticipativas y con objetivos específicos que tienen por fin minimizar el efecto de los impactos más probables o severos (Blate et al. 2009).
- **Clases naturales de edad**
 - **Monte bravo:** Una de las clases naturales de edad del arbolado, que comienza cuando se inicia la tangencia de copas o bien se alcanza una altura de 130 cm y se mantiene hasta que se inicia la poda natural y la edad de latizal (SECF, S.F.).
 - **Latizal:** Una de las clases naturales de edad del arbolado, que comienza cuando se inicia la poda natural y se mantiene hasta que el diámetro alcanza los 20 cm (SECF, S.F.).
 - **Fustal:** Una de las clases naturales de edad del arbolado, que se inicia cuando el diámetro supera los 20 cm y se mantiene hasta el final de la vida de la masa o del pie (SECF, S.F.).
 - **Repoblado:** Una de las clases naturales edad del arbolado, que comienza cuando se acaba la edad de diseminado, es decir, se ha producido la lignificación del tallo y la ramificación y se ha alcanzado una altura de entre 25 y 50 cm, y termina cuando aparece la tangencia de copas o bien se alcanza una altura de 130 cm (SECF, S.F.).
- **Clara:** Tratamientos parciales sobre el vuelo que consiste en la corta de parte de los pies de la masa principal regular en los estados de latizal y fustal con el objetivo de mejorar la estabilidad y calidad de la masa, eliminando los pies peor conformados, obteniendo productos maderables, controlando la composición específica y favoreciendo el crecimiento de los pies remanentes (SECF, S.F.; Serrada, 2011).
- **Clareo:** Corta que se hace en un rodal regular, en estado de repoblado o monte bravo, con el objetivo de mejorar la estabilidad de la masa, sin obtener productos maderables, controlando la composición específica y favoreciendo el crecimiento de los pies remanentes (SECF, S.F.).

- **Cortas de regeneración:** Tratamiento cuya finalidad es regenerar la masa y obtener una forma principal de masa determinada. Se aplica en concordancia con la edad del turno o madurez (Serrada, 2011). Se puede distinguir entre los siguientes tipos:
 - *Cortas continuas* – producen y mantienen masas regulares (p. ej. cortas a hecho, cortas por aclareo sucesivo uniforme).
 - *Cortas semicontinuas* – producen y mantienen masas semirregulares, entre las que se encuentran (p. ej. cortas por aclareo sucesivo por bosquetes, cortas por aclareo sucesivo por fajas).
 - *Cortas discontinuas* – producen y mantienen masas irregulares (p. ej. cortas por entresaca, cortas por huroneo).
- **Cortas de mejora:** Tratamientos parciales, que no están ligados en su aplicación a la edad de la masa, su objetivo no es regenerar sino mejorar las condiciones de vida, espesura y sanidad de la masa (Serrada, 2011).
- **Cortas a hecho:** Cortas continuas que dan lugar a masas regulares, consistentes en la extracción total de los pies de la masa principal que forman el rodal en regeneración, en un corto período de tiempo. Aunque no se excluye en principio que las masas resultantes sean mixtas, normalmente serán monoespecíficas (Serrada, 2011).
- **Entresaca:** Tratamiento que da origen a una masa irregular que supone cortas de pies distribuidos por toda su extensión. Las cortas por entresaca son cortas discontinuas que generan y mantienen masas irregulares (Serrada, 2011).
 - *Entresaca por bosquetes:* Variante en el que los pies cortables se seleccionan por grupos más que por pies aislados (SECF, S.F.).
 - *Entresaca regularizada:* Cortas orientadas por la comparación con un modelo previo de monte entresacado ideal. Se practica el señalamiento pie a pie.
- **Fenotipo:** Manifestación variable de la información genética (genotipo) de un organismo en un determinado ambiente.
- **Gestión forestal sostenible:** Organización, administración y uso de los bosques de manera que se mantenga su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración, vitalidad y su potencialidad para atender en el presente y en el futuro las funciones ecológicas, económicas y sociales propias relevantes a escala local, nacional y global, sin producir daños a otros ecosistemas (Ley de Montes de 2003).
- **Gestión adaptativa:** Enfoque dinámico de gestión de los recursos naturales que se basa en el monitoreo constante de los efectos de tratamientos y/o decisiones que se emplean, junto a los resultados de investigación, para modificar la gestión de forma continua y asegurar el cumplimiento de los objetivos (Helms, 1998).
- **Masa regular:** Masa formada por árboles de una misma clase de edad. Masa en la que la diferencia de edad de sus pies es pequeña, del orden de 10 a 20 años como máximo. En el

caso de turnos largos puede llegar a alcanzar excepcionalmente el 25 del turno (SECF, S.F.; Serrada, 2011).

- **Masa irregular:** Masa que presenta árboles con mezcla de diferentes clases de edad (SECF, S.F.).
- **Monte alto:** Masa arbórea nacida de semilla (más del 80%). Terreno ocupado por una masa de estas características (SECF, S.F.; Serrada, 2011).
- **Monte medio:** Masa que se renueva tanto a partir de semillas como de brotes, es decir, el formado por brinzales y chirpiales (SECF, S.F.).
- **Monte bajo:** Masa arbórea compuesta por pies procedentes de brotes de cepa y/o de raíz (más del 80%) (SECF, S.F.; Serrada, 2011).
- **Mitigación:** Intervención para reducir las causas antropogénicas del cambio climático; incluye estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para mejorar los sumideros (IPCC, 2007). La gestión forestal para la mitigación se centra en aumentar la superficie forestal, reducir la deforestación y degradación, incrementar la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques, aumentar la vida útil de los productos forestales y promover la sustitución de combustibles fósiles por biomasa forestal (Millar et al., 2007).
- **Recepar:** Cortar por la base una planta para separar los tallos y dar lugar a la emisión de brotes de cepa (SECF, S.F.).
- **Resalveo:** Tratamiento del monte bajo, por el que se reservan ciertos vástagos de chirpiales para su aprovechamiento en cortas posteriores (SECF, S.F.).
- **Resalveo de conversión:** Conjunto de operaciones, basadas en un plan de claras por lo bajo, que se aplican a un monte bajo regular para conducirlo a un fustal sobre cepa (SECF, S.F.).
- **Resalvo:** Pie exceptuado de la corta en un monte medio regular o en un monte bajo regular (SECF, S.F.).
- **Resiliencia:** Capacidad de un sistema social o ecológico para absorber perturbaciones, manteniendo la misma estructura básica y las formas de funcionamiento, la capacidad de autoorganización y la capacidad de adaptarse al estrés y cambio (IPCC, 2007).
- **Resistencia:** Capacidad de un ecosistema para soportar perturbaciones sin una pérdida significativa de la estructura o función. Desde una perspectiva de gestión, la resistencia incluye: 1) el concepto de aprovechar y potenciar el grado inherente (biológico) en que las especies son capaces de resistir el cambio, y 2) la manipulación del ambiente físico para contrarrestar y resistir el cambio físico y biológico (CCSP, 2008).

- **Sarda:** Conjunto de pies que forman el estrato inferior en un monte medio regular. Tiene estructura regular, un turno equivalente a las clases de edad de la resalvía y puede ocupar todo el espacio (SECF, S.F.).
- **Selvicultura próxima a la naturaleza:** Concepto propuesto en la Estrategia Forestal Europea 2030 que pretende promover los valores de conservación y resiliencia climática de bosques de gestión multifuncional en Europa. Cuenta con 7 principios: (i) retener árboles que sean un hábitat preferente de especies, así como madera muerta; (ii) promover especies autóctonas y adaptadas al sitio; (iii) facilitar la regeneración natural; (iv) impulsar la heterogeneidad del rodal extracciones moderadas/parciales; (v) promover las masas mixtas y la diversidad genética; (vi) evitar operaciones de gestión intensas; y (vii) apoyar la heterogeneidad y funcionalidad a escala de paisaje (Larsen et al., 2022).
- **Selvicultura adaptativa:** Selvicultura que busca promover la resiliencia y resistencia de los bosques a los impactos actuales y esperados del cambio climático (Bravo-Oviedo et al., 2008).
- **Turno:** En las masas tratadas por cortas continuas, periodo de tiempo que media desde el establecimiento o renovación de una masa hasta que da productos principales con el grado de madurez que exijan unas condiciones determinadas. En ese momento debe procederse a la corta de regeneración (SECF, S.F.).
- **Vitalidad [de las masas]:** Se refiere al grado de vigor o prosperidad alcanzado por los individuos en su desarrollo vegetativo y reproducción (Serrada, 2011).