



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



El papel de la gestión forestal en la vulnerabilidad del bosque mediterráneo frente a sequías, incendios y tormentas

AMEZTEGUI, A.^{1,2}, MORÁN-ORDÓÑEZ, A.³; RODRIGUES, M⁴; DE CÁCERES, M³. y COLL, L.^{1,2}

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universitat de Lleida.

² JRU CTFC-Agrotecnio.

³ CREAM.

⁴ Universidad de Zaragoza.

Resumen

Los bosques mediterráneos sufrirán cada vez perturbaciones más frecuentes, intensas y duraderas, que pueden alterar de forma irreversible su dinámica y su capacidad de proveer de servicios ecosistémicos. La silvicultura puede ayudar a reducir su vulnerabilidad o aumentar su resiliencia frente a estos fenómenos, pero no está claro qué tratamientos son más adecuados en función de la especie dominante, la estación o el escenario climático. Este trabajo utiliza un enfoque de modelización para evaluar la vulnerabilidad futura del bosque mediterráneo bajo dos escenarios climáticos y cuatro escenarios de gestión, que suponen (i) mantener la gestión actual; (ii) maximizar el almacenamiento de carbono; (iii) maximizar la producción de biomasa; y (iv) fomentar la adaptación del bosque a la escasez hídrica. Se evalúa la dinámica y provisión de servicios de 260 parcelas de pino laricio (*Pinus nigra*) y pino albar (*Pinus sylvestris*) bajo los distintos escenarios, y se determina su vulnerabilidad frente a daños por viento, incendios, y estrés hídrico. Los resultados muestran que las opciones de silvicultura de adaptación a la sequía, pese a proveer una menor cantidad global de servicios ecosistémicos, son las más recomendables para minimizar los riesgos climáticos, permitiendo al bosque adaptarse y suponiendo por tanto una silvicultura de "bajo riesgo" frente a la incertidumbre asociada al cambio global.

Palabras clave

Simulaciones, perturbaciones, adaptación cambio climático, escenarios de gestión, bosque submediterráneo.

1. Introducción

La cuenca Mediterránea se identifica como una de las regiones más sensibles a los efectos del cambio climático (MEDECC, 2020). Los principales modelos regionales predicen incrementos notables de temperatura media anual, con ascensos que a finales de siglo pueden oscilar entre 3 y 8°C en función del escenario de emisiones considerado, así como un incremento de eventos extremos, especialmente en verano (ej. mayor frecuencia, duración e intensidad de olas de calor; IPCC, 2021). Dichos cambios han empezado ya a producirse, y tanto las subidas en temperatura como sus efectos sobre la salud, dinámica y funcionalidad de los bosques pueden ya percibirse en el conjunto de la cuenca mediterránea (MEDECC, 2020), si bien se espera que se recrudezcan en el futuro.

Uno de los principales efectos de los cambios en el clima sobre los bosques se producirá por la alteración del régimen de perturbaciones. Las perturbaciones, tanto las de carácter abiótico (incendios, sequías, viento), como las bióticas (plagas y enfermedades) son parte indisoluble de la dinámica natural de los ecosistemas forestales (SEIDL et al., 2020), teniendo la capacidad de alterar la estructura, composición y distribución de los bosques. A pesar de que las perturbaciones son agentes que contribuyen a la heterogeneidad del paisaje y la diversidad de los ecosistemas forestales, hay cada vez más evidencias de que los regímenes de perturbaciones están cambiando en respuesta a los cambios en el clima (FORZIERI et al., 2021; LECINA-DIAZ et al., 2020; SENF and

SEIDL, 2021). Además, se espera que la frecuencia y la severidad de las perturbaciones sigan aumentando en las próximas décadas (SEIDL et al. 2009, MORITZ et al. 2012). A pesar de que los bosques son sistemas ampliamente resilientes frente a cambios a largo plazo (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2016), son vulnerables a los cambios abruptos, ya que su longevidad les impide adaptarse con la rapidez necesaria (FORZIERI et al., 2021).

En este contexto, los incrementos en la frecuencia, duración y severidad de las perturbaciones pueden alterar la composición y estructura de los bosques, poniendo en riesgo no sólo la provisión de servicios ecosistémicos sino la propia persistencia del bosque (LINDNER et al., 2014; MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2021). La gestión forestal adaptativa tiene la oportunidad de contribuir a adaptar los bosques a los futuros regímenes de perturbaciones, bien reduciendo su vulnerabilidad frente a los mismos o aumentando su capacidad de recuperación o resiliencia. Algunos trabajos recientes han evaluado cómo diferentes opciones de gestión forestal pueden afectar a la provisión de servicios ecosistémicos (DÍAZ-YÁÑEZ et al., 2020; MINA et al., 2016; MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2020). Asimismo, existen numerosas experiencias y estudios que evalúan el papel de la silvicultura para reducir el riesgo de incendio (PIQUÉ et al., 2011; REGOS et al., 2016, 2014), limitar la mortalidad por sequía (AMEZTEGUI et al., 2017; BATLLORI et al., 2017; DE CÁCERES et al., 2021; DEL CAMPO et al., 2019, 2017), o aumentar la estabilidad de la masa frente a los daños por viento (DÍAZ-YÁÑEZ et al., 2016; MINA et al., 2016). Sin embargo, aún faltan estudios que integren la vulnerabilidad de diferentes tipos de gestión frente a las principales perturbaciones. Este es precisamente el objetivo del presente trabajo, que se construye a partir de la integración de ejercicios previos en el campo de la modelización, la cuantificación de servicios, y la evaluación de la vulnerabilidad y la resiliencia frente a las perturbaciones.

2. Objetivos

El presente estudio pretende evaluar el riesgo futuro frente a las principales perturbaciones abióticas (incendios, vientos, sequía) de bosques submediterráneos, bajo diferentes alternativas de gestión forestal y escenarios climáticos. Para ello se realiza un ejercicio de simulación, en el que se evalúa de manera conjunta la exposición del bosque a las perturbaciones (que depende sobre todo de la meteorología a corto y medio plazo) y la vulnerabilidad frente a ellas (que depende fundamentalmente de la composición y estructura del bosque). El objetivo final es dotar a los gestores de herramientas que les permitan evaluar de manera objetiva y cuantificable el riesgo en que se incurre al optar por una u otra alternativa de gestión.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

Para realizar este estudio seleccionamos la comarca del Solsonès, localizada en el prepirineo de Cataluña. Como zona de transición entre las llanuras del valle del Ebro y las cumbres pirenaicas, la elevación presenta un marcado gradiente sur-norte, variando desde los 400 a más de 2400 m. El clima es Mediterráneo subhúmedo, con temperaturas medias de 12°C y precipitaciones de alrededor de 650 mm, concentradas en otoño y primavera. Se trata de una comarca poco poblada, con tan sólo 13 habitantes por kilómetro cuadrado, que además se concentran casi en su totalidad en la capital comarcal, Solsona, mientras que el resto del territorio se encuentra prácticamente despoblado. El bosque cubre el 60% de la superficie, con importantes cambios en la especie dominante, como consecuencia del gradiente de elevaciones. Las partes meridionales están pobladas por bosques de pino carrasco y robles perennifolios, mientras que en la zona central dominan *Pinus nigra* y *Quercus pubescens*. Las montañas de la parte norte contienen importantes poblaciones de *Pinus sylvestris*, y una presencia destacable de *Pinus uncinata* en las cotas más altas. Este estudio se centra en los bosques de *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris* del Solsonès, que en conjunto suponen 2/3 del total de la superficie forestal de la comarca.

3.2. Definición de escenarios climáticos y de gestión

Realizamos simulaciones bajo dos escenarios de emisiones según el IPCC: un escenario de emisiones moderado (RCP 4.5), que supone incrementos de temperatura de unos 3°C a finales de siglo; y un escenario severo (RCP 8.5), que predice incrementos de hasta 6°C y reducciones de un 20% en la precipitación. Los datos climáticos se obtuvieron a partir de las proyecciones regionales del proyecto EU-CORDEX (<http://esgf.llnl.gov/>) y se reescalaron a 1 km de resolución mediante el paquete de R *meteoland* (DE CÁCERES et al., 2018).

Asimismo, se generaron 4 escenarios de gestión forestal a partir de las políticas supranacionales definidas en EFSOS (European Forest Sector Outlook Study) UNECE, 2011). Con la ayuda de expertos locales, cada uno de dichos escenarios se tradujo en un plan específico de gestión forestal (detallando la edad de cada intervención, y el tipo - regeneración, mejora - y peso de cada una, tal y como se detalla en MORÁN-ORDÓÑEZ et al. (2020). El primer escenario “**promoción de la bioenergía**” contempla un futuro en el que se busca la neutralidad en carbono mediante la sustitución de energías fósiles por fuentes de energía renovable (biomasa). Se opta por tanto por turnos cortos (80 años) y pocas claras, fomentando un uso de la madera como combustible, El segundo escenario, llamado “**almacenamiento de carbono**”, busca mitigar los efectos del cambio climático a partir de aumentar los stocks de carbono de los bosques y la promoción de productos de larga vida útil (madera estructural, muebles), lo cual implica alargar los turnos hasta casi 200 años, e implementar un régimen de claras encaminado a producir madera de mayores dimensiones. El tercer escenario, “**reducción de la vulnerabilidad climática**” busca mejorar la adaptación de los bosques a la escasez hídrica prevista en el futuro mediante claras tempranas y fuertes. Por último, el escenario “**gestión actual**” reproduce la silvicultura más común en la zona, que consiste en la corta por huroneo, cada 15-20 años, de los pies más grandes de la parcela.

3.3. Simulación de la dinámica forestal

Simulamos la dinámica de los bosques objeto de estudio para el periodo 2020-2100 utilizando el software SORTIE-ND (<http://www.sortie-nd.org>). SORTIE-ND es un modelo de simulación de dinámica forestal espacialmente explícito y basado en el individuo, es decir que simula la demografía de cada uno de los árboles que componen una parcela. El modelo predice la composición y estructura de la parcela (de 1 ha) a partir del crecimiento, mortalidad y tasa de reproducción de cada uno de los árboles, que a su vez dependen de factores como la disponibilidad de recursos, el tamaño, el clima, la especie o la competición ejercida por los vecinos. En concreto, la competición que sufre cada uno de los árboles de la parcela se determina a partir de la identidad específica y tamaño de cada uno de los árboles vecinos, así como su distancia al árbol focal. Esto hace a SORTIE-ND especialmente adecuado para la simulación de rodales mixtos con estructuras complejas, y le permite capturar de manera realista los efectos de los distintos tipos de gestión sobre la masa restante. SORTIE-ND produce estimaciones anuales de composición y estructura, basadas en la identidad, posición y tamaño de cada uno de los árboles que conforman la parcela. Esto permite calcular con suficiente detalle la provisión de los numerosos servicios ecosistémicos que depende de las características del bosque, así como determinar la vulnerabilidad frente a varias perturbaciones.

Los parámetros necesarios para realizar las simulaciones con SORTIE-ND se obtuvieron de estudios previos (AMEZTEGUI et al., 2017; GÓMEZ-APARICIO et al., 2011; MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2020). La composición y estructura actual de los bosques estudiados se obtuvo a partir de las 261 parcelas de estas especies ubicadas en el Solsonès según el Tercer Inventario Forestal Nacional, a las que se aplicaron una combinación de los 2 escenarios de emisiones y 4 escenarios de gestión. Cada combinación de escenarios se repitió 10 veces para eliminar posibles efectos de la aleatoriedad de algunos procesos (mortalidad, etc.), por lo que el total de simulaciones efectuadas fue de 20.880 (261 parcelas x 8 escenarios x 10 repeticiones).

3.4. Cuantificación de la vulnerabilidad frente a perturbaciones

Determinamos el riesgo de las estructuras resultantes frente a las tres principales perturbaciones abióticas: incendios forestales, sequías y daños por viento. El riesgo se consideró como la combinación de exposición a un factor y la vulnerabilidad frente al mismo. De esta manera, un rodal puede tener un riesgo bajo a pesar de ser muy vulnerable frente a incendios, si se ubica en una zona con poca probabilidad de igniciones. Igualmente, un rodal ubicado en una zona con alta ocurrencia de incendios puede tener poco riesgo si la estructura y composición son poco vulnerables. La combinación de exposición y vulnerabilidad permite incorporar los efectos del cambio climático y la gestión sobre el riesgo, ya que pueden afectar a ambos factores al mismo tiempo (LECINA-DIAZ et al., 2020).

Los cálculos del comportamiento del fuego se realizaron utilizando el paquete *medfate* en R (DE CÁCERES et al., 2015, 2021). El paquete incluye funciones para determinar tanto las características del combustible como el comportamiento del fuego. *medfate* utiliza los datos meteorológicos y el balance hídrico del rodal para determinar la humedad del combustible para 5 estratos (cubierta, matorral, herbáceas, material leñoso muerto y hojarasca). A partir de estos valores calcula parámetros de comportamiento del fuego (por ejemplo, la longitud de llama, la tasa de propagación, la intensidad del frente de llamas y el índice de potencial de fuego de copa) a partir de una modificación del Sistema de Clasificación de Características del Combustible (FCCS) descrito por PRICHARD et al. (2013). De la amplia gama de resultados que proporciona FCCS seleccionamos la tasa de propagación del fuego de copa (*rate of spread*; m/min) y el índice de probabilidad de fuego de copa (*crown fire initiation index*; 0-9, adimensional). La tasa de propagación es un indicador clave de la peligrosidad de los incendios forestales y de la capacidad de extinción (cuanto más bajo sea, mayor es la posibilidad de contener un incendio) y muestra una estrecha relación con la intensidad del fuego y la geometría del frente de llamas. El índice de potencialidad de incendios de copa, relacionado con la continuidad vertical de combustible, nos permite comprender mejor la probabilidad de experimentar un evento de incendio de copa.

El riesgo de daños por sequía se determinó siguiendo la aproximación desarrollada en (AMEZTEGUI et al., 2017): los valores de estructura y composición vegetal se combinaron con la información meteorológica a resolución diaria (temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación...) para determinar el estrés hídrico que sufría cada especie cada día a lo largo del periodo simulado. Dichos indicadores están íntimamente relacionados con el riesgo de fallo hidráulico por estrés, de acuerdo con el umbral definido en DE CÁCERES et al. (2015), y se agregaron a valores anuales como (i) el número de días con estrés hídrico al año (NDD); y (ii) el máximo valor anual de estrés diario (MDS; adimensional, de 0 a 1).

Finalmente, el riesgo de daños por viento se determinó a partir del índice de Hart-Becking de la masa, también conocido como coeficiente de espaciamiento, según la fórmula:

$$S = \frac{a}{H_0} \cdot 100$$

donde a es el espaciamiento medio, que se puede deducir de la densidad; y H_0 es la altura dominante de la masa. El índice de Hart-Becking se expresa como porcentaje, con los valores más altos indicando masas menos estables (menor densidad y mayor altura del arbolado), y por tanto más vulnerables a los daños por viento.

4. Resultados

El índice de potencial de inicio de fuegos de copas mostró escasa variación temporal o entre tipos de bosque, y los escenarios de adaptación y de almacenamiento de carbono mostraron consistentemente los valores más bajos (Figura 1a). Destaca el comportamiento del escenario de promoción de la biomasa que, si bien mantenía valores bajos en buena parte del periodo analizado, presenta una subida brusca hacia el año 2060, coincidiendo con la llegada a turno de numerosas parcelas. Justo después de las cortas de regeneración se crean estructuras con gran continuidad vertical de combustible durante unos pocos años, lo que incide en la probabilidad de incendio de copas, si bien presentan menor intensidad de fuego por su limitado tamaño. Sin embargo, tan sólo unos años después la probabilidad vuelve a decrecer, correspondiendo a una mayor distancia entre estrato arbustivo y arbolado (Figura 1a). En cuanto a la tasa de propagación, las parcelas gestionadas mediante huroneo (gestión actual) mostraron siempre los valores más altos, como corresponde con la continuidad horizontal de combustible propia de este tipo de aprovechamiento (Figura 1b). El resto de los escenarios de gestión predijeron tasas de propagación mucho menores, siempre inferiores a los 20 m/min, si bien la gestión de adaptación al cambio climático se mostró más eficaz manteniendo una tasa baja para el escenario climático severo, mientras que el resto de los escenarios mostraron un aumento de la tasa de propagación hacia finales de siglo (Figura 1b).

Los valores de riesgo por sequía mostraron gran variabilidad interanual, como corresponde a su gran dependencia de los valores meteorológicos. Sin embargo, el escenario de gestión mostró un efecto muy importante, con la gestión actual produciendo los valores de riesgo asociados a intensidad de sequía más elevados, en muchas ocasiones superiores al umbral de 0.5 que se considera recomendable para evitar la mortalidad por fallo hidráulico (Figura 2b). Los valores más bajos, tanto en número de días con estrés hídrico como en intensidad, se produjeron con la gestión de adaptación, mientras que el fomento de la biomasa y la provisión de carbono mostraron valores intermedios (Figura 2). En todos los casos, los valores de sequía fueron ligeramente más elevados para *Pinus sylvestris* y para el escenario climático severo (RCP 8.5), aunque las diferencias fueron muy leves.

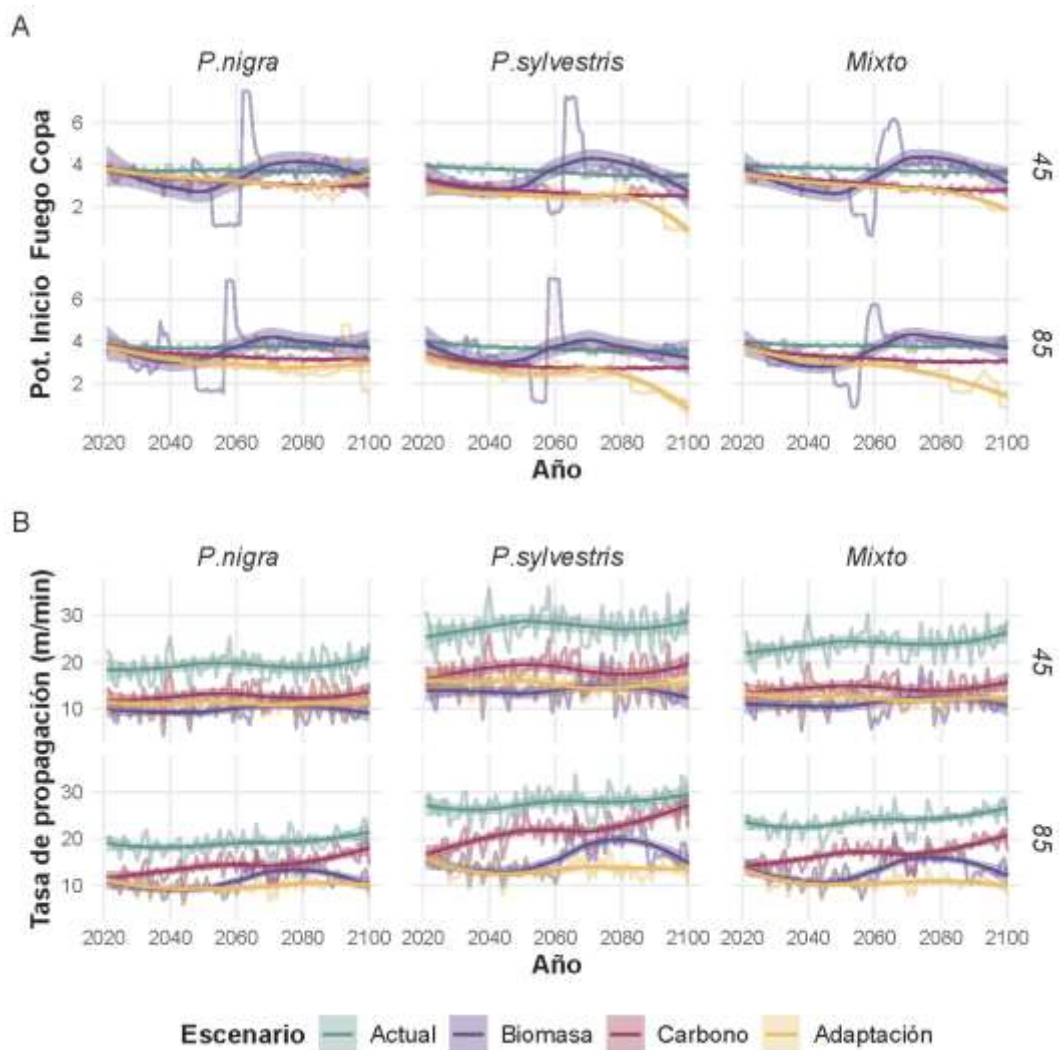


Figura 1. Evolución de los parámetros de riesgo de incendio (a) probabilidad de comienzo de fuego de copas y (b) tasa de propagación entre 2020 y 2100 en función de la especie principal, el escenario de gestión y el escenario de emisiones de GEI.

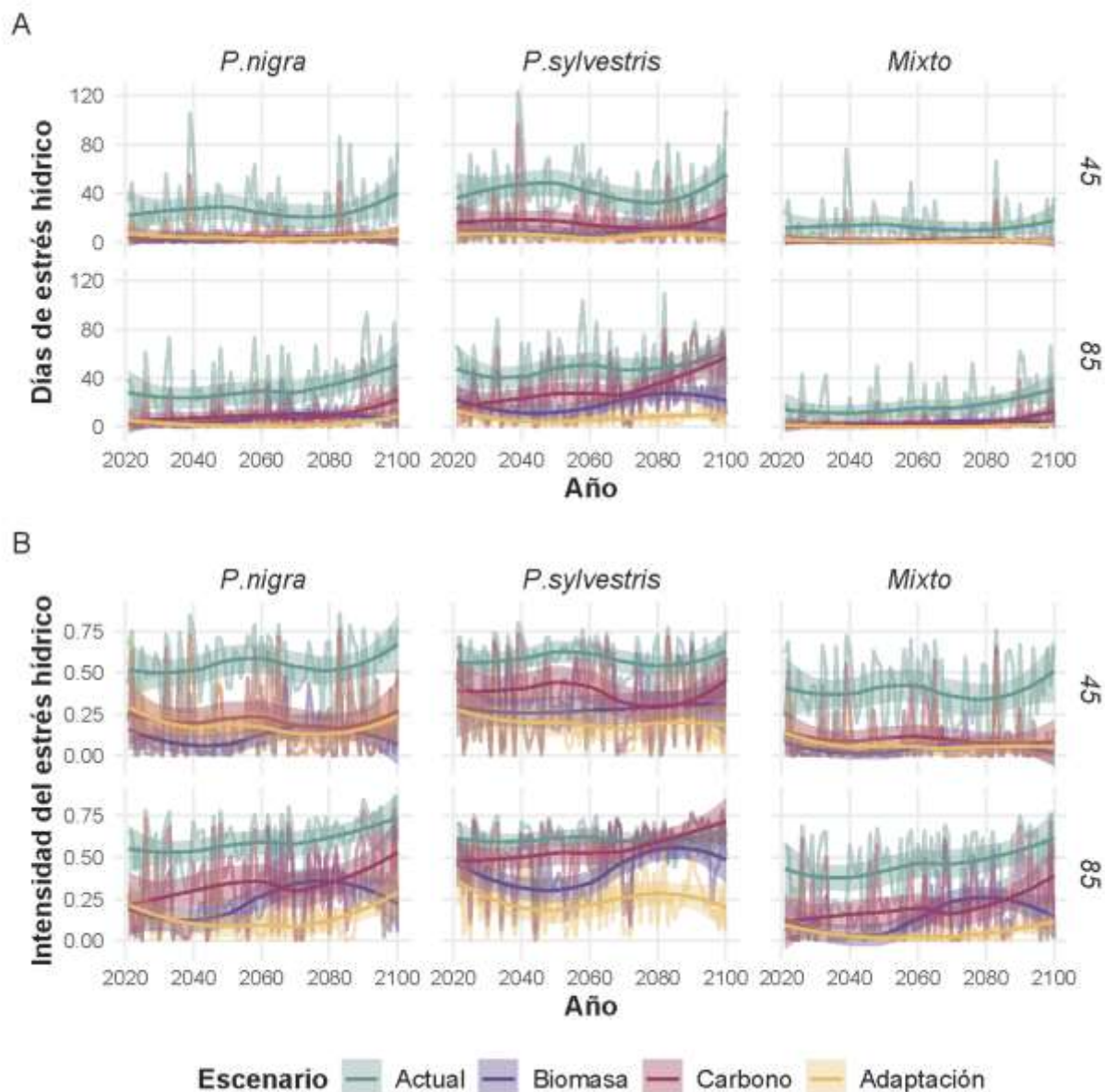


Figura 2. Evolución de los parámetros de riesgo por estrés hídrico: (a) número de días con estrés hídrico al año y (b) intensidad máxima anual del estrés entre 2020 y 2100 en función de la especie principal, el escenario de gestión y el escenario de emisiones de GEI

El índice de Hart-Becking presentó importantes oscilaciones a lo largo del tiempo, sobre todo para los escenarios más intervencionistas (promoción de la biomasa y adaptación al cambio climático). Además, las diferencias entre escenarios de gestión fueron las más marcadas, con la gestión actual presentando consistentemente los valores más bajos (por debajo de 20), mientras que el resto de las alternativas oscilaban entre valores de 30 y 40 (Figura 3). Destaca especialmente el escenario de adaptación a la vulnerabilidad climática, que provocó una tendencia creciente en el valor del índice para las masas de *Pinus sylvestris*, especialmente marcado en el caso del escenario climático severo.

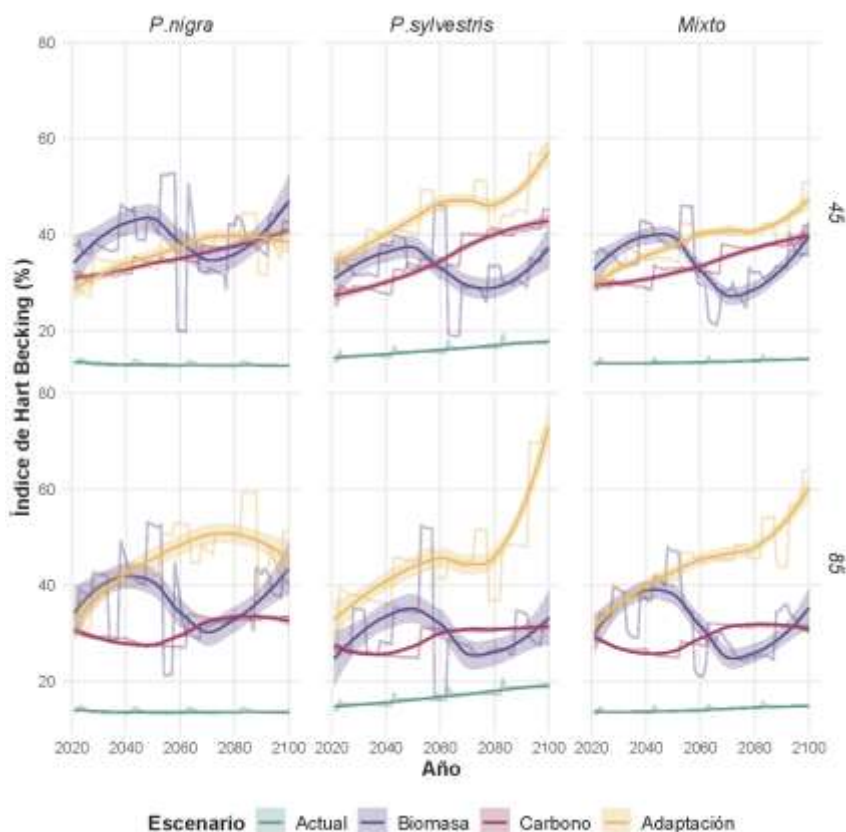


Figura 3. Evolución del índice de espesura de Hart-Becking entre 2020 y 2100 en función de la especie principal, el escenario de gestión y el escenario de emisiones de GEI.

La representación gráfica de los pares de riesgos a perturbaciones, así como de unos valores umbral, reveló algunos patrones de covariación interesantes. Por ejemplo, observamos que los escenarios que fomentan mayores tasas de propagación de incendios de copa también muestran mayores niveles de estrés por sequía (Figura 4). Si bien ninguno de los escenarios provocó de forma generalizada tasas de propagación superiores al umbral de 40 m/min que a menudo se toma como el límite de la capacidad de extinción, algunas parcelas sí alcanzaron valores de hasta 50 y 60 m/min durante algunos años, coincidiendo también con valores elevados de sequía. La mayor parte de estos casos se produjeron para el escenario de gestión actual, que de hecho situaba la mayor parte de las parcelas en valores de estrés hídrico superiores a 0.5 durante buena parte del periodo analizado, lo que supone un alto riesgo de fallo hidráulico.

Dicha correlación también se observó al comparar riesgo de incendio con riesgo por viento, fundamentalmente por los valores altos que presentan las parcelas gestionadas mediante huroneo (gestión actual) para ambas variables (Figura 5). La mayor parte de las parcelas gestionadas mediante este método presentaban estructuras muy densas, con valores del índice de Hart-Becking inferiores a 30, que suele ser el umbral designado para marcar la necesidad de reducción de la espesura. Dichas parcelas también presentaron valores de intensidad de sequía por encima del umbral recomendado, por lo que se daba una situación en la que, durante buena parte del turno, las parcelas gestionadas por huroneo presentaban riesgos elevados de daños por sequía y viento; y además, algunos años también presentaban riesgos elevados de incendio (Figura 6).

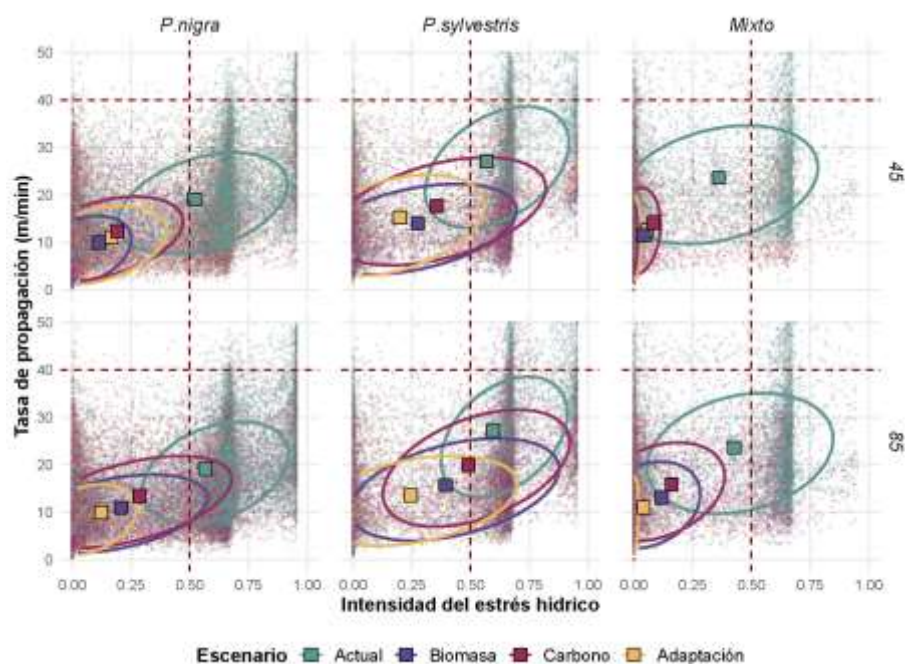


Figura 4. Gráfica de dispersión de los valores de riesgo de incendio de copas y de sequía en función de la especie principal y el escenario climático y de gestión. Los puntos representan cada una de las 261 parcelas y 80 años de simulación, mientras los cuadrados y la elipse representan los valores medios y el intervalo de confianza del 95%, respectivamente.

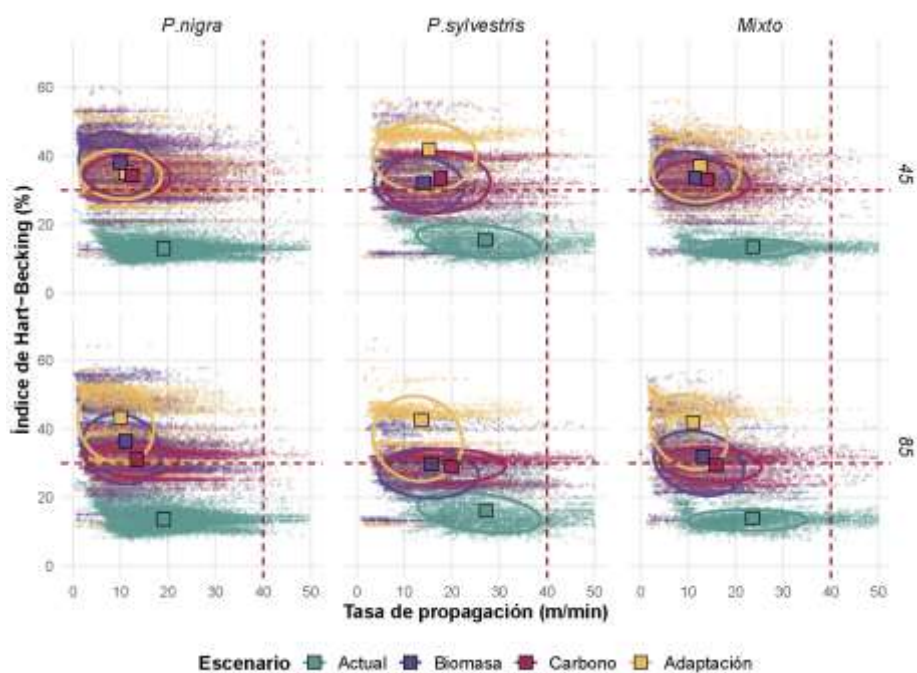


Figura 5. Gráfica de dispersión de los valores de riesgo por viento y de incendio de copas en función de la especie principal y el escenario climático y de gestión. Los puntos representan cada una de las 261 parcelas y 80 años de simulación, mientras los cuadrados y la elipse representan los valores medios y el intervalo de confianza del 95%, respectivamente.

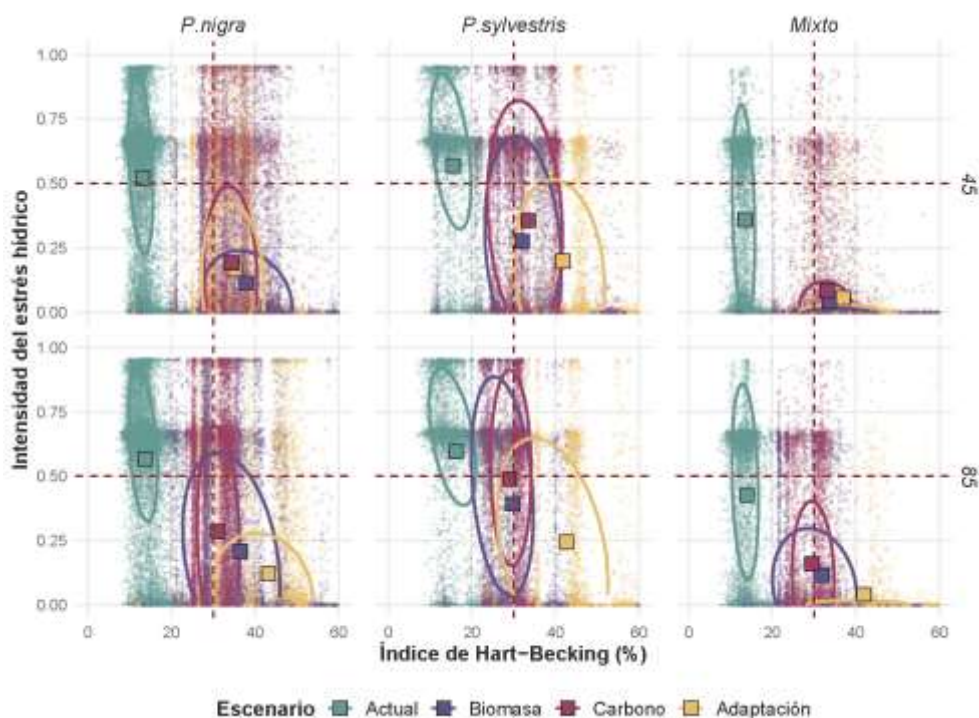


Figura 6. Gráfica de dispersión de los valores de riesgo de sequía y de derribos por viento en función de la especie principal y el escenario climático y de gestión. Los puntos representan cada una de las 261 parcelas y 80 años de simulación, mientras los cuadrados y la elipse representan los valores medios y el intervalo de confianza del 95%, respectivamente.

5. Discusión

En un contexto donde se esperan grandes cambios, no sólo en el clima sino también en la frecuencia, duración y severidad de perturbaciones y periodos extremos (MEDECC, 2020), la evaluación del riesgo en que se incurre al optar por una u otra alternativa de gestión aporta información muy relevante para informar la toma de decisiones en la gestión de los bosques mediterráneos. Este estudio aporta una evaluación global del riesgo, entendida como la combinación de exposición (probabilidad de que ocurra un evento determinado) y vulnerabilidad (susceptibilidad si el evento llega a producirse; LECINA-DIAZ et al., 2020). Esta visión aporta una información más adecuada que el análisis de la exposición o vulnerabilidad por separado, ya que permite decidir, por ejemplo, si estructuras vulnerables pueden resultar aceptables en zonas de exposición muy baja. O, al contrario, una vulnerabilidad moderada puede ser juzgada como no asumible si se sabe que estará muy expuesta a la perturbación analizada.

Nuestros resultados muestran que el escenario de gestión "actual" es el que supone mayor riesgo en términos de grandes incendios forestales. No sólo el riesgo de sufrir un fuego de copa es el más alto durante la mayor parte del periodo analizado, sino que, además, en caso de producirse, la tasa de propagación es considerablemente más alta que en otros escenarios, lo cual dificultaría de manera decisiva la contención (DUANE et al., 2021; GONZALEZ-OLABARRIA et al., 2019). Cualquiera de los escenarios que implican una gestión más planificada y activa supone una disminución importante del riesgo de incendio, subrayando la conveniencia de gestionar las masas de pino para reducir su vulnerabilidad (PIQUÉ et al., 2011). La consideración conjunta de ambas variables revela que la gestión para la "adaptación" es la alternativa más segura en términos de mitigación del peligro de incendio, a pesar de no estar diseñada para este fin. Este escenario proporciona una importante disminución del combustible disponible, suponiendo un buen equilibrio

entre la disminución del potencial de fuego de copa y el mantenimiento de una tasa de propagación baja (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2021, 2019). Dicha alternativa de gestión se revela especialmente indicada en un escenario climático severo, ya que minimiza ambas métricas. Además, es la alternativa más estable en términos de variabilidad temporal, garantizando que la producción de fuego no escalará ni alcanzará su punto máximo en ningún momento.

Cualquiera de los escenarios de gestión alternativos a la gestión “actual” (carbono, biomasa o adaptación) lleva a estructuras menos densas que las actuales, mejorando de forma considerable la estabilidad de las masas frente a vientos fuertes (FORZIERI et al., 2020; SÁNCHEZ-PINILLOS, 2014). La excepción es la gestión actual, en la que la extracción sistemática de los mayores pies, pero con pesos claramente inferiores al crecimiento corriente, lleva a un estancamiento de la masa, con espesuras excesivas y pies de escaso desarrollo. Dicha estructura, que puede observarse actualmente en muchas de las masas de esta zona, sobre todo de pino laricio (PIQUÉ et al., 2012), supone un elevado riesgo en caso de rachas intensas de viento. Si bien este fenómeno no es el más habitual en el área de estudio, se prevé que las grandes tormentas se vuelvan más frecuentes e intensas, con vientos que pueden superar los 100 km/h, como se vio hace 3 años tras el paso de la tormenta Vaia por el Trentino (FORZIERI et al., 2020). Nuestros resultados muestran que la gestión actual supondría un riesgo muy elevado en caso de un fenómeno similar.

La gestión para adaptación al cambio climático cumple su objetivo, y fue la que presentó indicadores de estrés por sequía más contenidos, tanto en número de días como en intensidad de sequía. La gestión encaminada a producir biomasa también redujo considerablemente la sequía, al proponer claras intensas y turnos cortos. En cambio, la gestión de turnos largos y, sobre todo la actual, no son capaces de mantener los indicadores de riesgo de sequía por debajo de los umbrales recomendables, sobre todo en los rodales de *Pinus sylvestris*, que son más vulnerables. Numerosos trabajos han sugerido la importancia de claras tempranas y fuertes para reducir el riesgo de estrés hídrico futuro (AMEZTEGUI et al., 2017; DEL CAMPO et al., 2017), y nuestra simulación confirma dicha conveniencia, sobre todo en escenarios climáticos severos. Por otro lado, mantener la gestión actual pone las masas en riesgo de estrés por sequía durante buena parte del siglo, lo que podría llevar a altas tasas de mortalidad, que supondrían un incremento del riesgo de otras perturbaciones, tanto incendios como daños por viento.

En un trabajo previo MORÁN-ORDÓÑEZ et al. (2020) analizamos la provisión de servicios ecosistémicos bajo estos mismos escenarios climáticos y de gestión, observando que no existe una opción de gestión que maximizara la provisión de todos los servicios. Tal y como indicamos entonces, defendemos que nuestro trabajo debe servir de orientación y ayuda para los gestores, que deben tomar la decisión final en función de su conocimiento y teniendo en cuenta el contexto local de cada monte, los objetivos de la gestión, y las diferentes demandas de servicios en la zona. En este sentido, el presente trabajo supone una ayuda más para evaluar hasta qué punto la gestión que se aplique hoy puede suponer situar la masa en situaciones de riesgo en unas cuantas décadas. Lógicamente, este trabajo supone un ejercicio de modelización, y no cabe esperar que los valores de riesgo de un momento concreto se cumplan de manera exacta. Sin embargo, los valores de probabilidad estimados, las tendencias y, sobre todo, las diferencias entre escenarios son suficientemente claras como para inferir recomendaciones.

6. Conclusiones

Teniendo en cuenta el contexto actual de cambio, parece claro que la gestión actual supone un riesgo inasumible para los pinares del Prepirineo, situándolas en valores elevados de riesgo por sequía, incendios, y tormentas. Por otro lado, una gestión más intensa, buscando reducir espesuras de manera temprana, parece la opción más sensata ante la incertidumbre de las condiciones futuras. La gestión para la adaptación puede ir acompañada de otras medidas que aumenten la

resiliencia de las masas forestales si la perturbación llega a ocurrir, si bien este componente no ha sido tenido en cuenta en este estudio.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto UMBRACLIM (PID2019-111781RB-I00)

8. Bibliografía

AMEZTEGUI, A., CABON, A., DE CÁCERES, M., COLL, L., 2017. Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: A modelling approach. *Ecol Model* 356, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.04.006>

BATLLORI, E., DE CÁCERES, M., BROTONS, L., ACKERLY, D.D., MORITZ, M.A., LLORET, F., 2017. Cumulative effects of fire and drought in Mediterranean ecosystems. *Ecosphere* 8, e01906. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1906>

DE CÁCERES, M., MARTÍNEZ-VILALTA, J., COLL, L., LLORENS, P., CASALS, P., POYATOS, R., PAUSAS, J.G., BROTONS, L., 2015. Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes. *Agr Forest Meteorol* 213, 77–90.

DE CÁCERES, M., MARTIN-STPAUL, N., TURCO, M., CABON, A., GRANDA, V., 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environ Modell Softw* 108, 186–196.

DE CÁCERES, M., MENCUCCINI, M., MARTIN-STPAUL, N., LIMOUSIN, J.-M., COLL, L., POYATOS, R., CABON, A., GRANDA, V., FORNER, A., VALLADARES, F., MARTÍNEZ-VILALTA, J., 2021. Unravelling the effect of species mixing on water use and drought stress in Mediterranean forests: A modelling approach. *Agr Forest Meteorol* 296, 108233.

DEL CAMPO, A.D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., GARCÍA-PRATS, A., CEACERO, C.J., LULL, C., 2019. The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice. *Agricultural and Forest Meteorology* 264, 266–282.

DEL CAMPO, A.D., DEL, GONZÁLEZ-SANCHIS, M., LIDÓN, A., GARCÍA-PRATS, A., LULL, C., BAUTISTA, I., RUÍZ-PÉREZ, G., FRANCÉS, F., KŘEČEK, J., HAIGH, M., HOFER, T., KUBIN, E., PROMPER, C., 2017. Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate, in: *Ecosystem Services of Headwater Catchments*. Springer International Publishing, Cham, pp. 45–57.

DÍAZ-YÁÑEZ, O., MOLA-YUDEGO, B., ERIKSEN, R., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R., CARCAILLET, C., 2016. Assessment of the Main Natural Disturbances on Norwegian Forest Based on 20 Years of National Inventory. *Plos One* 11, e0161361.

DÍAZ-YÁÑEZ, O., PUKKALA, T., PACKALEN, P., LEXER, M.J., PELTOLA, H., 2020. Multi-objective forestry increases the production of ecosystem services. *For Int J For Res* 94, 386–394.

DUANE, A., CASTELLNOU, M., BROTONS, L., 2021. Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. *Climatic Change* 165, 43.

EUROPE, U.NATIONS.E.C. FOR, 2011. The European Forest Sector Outlook Study II, 2010-2030, United Nations Publications.

FORZIERI, G., GIRARDELLO, M., CECCHERINI, G., SPINONI, J., FEYEN, L., HARTMANN, H., BECK, P.S.A., CAMPS-VALLS, G., CHIRICI, G., MAURI, A., CESCATTI, A., 2021. Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nat Commun* 12, 1081.

FORZIERI, G., PECCHI, M., GIRARDELLO, M., MAURI, A., KLAUS, M., NIKOLOV, C., RÜETSCHI, M., GARDINER, B., TOMAŠTÍK, J., SMALL, D., NISTOR, C., JONIKAVICIUS, D., SPINONI, J., FEYEN, L., GIANNETTI, F., COMINO, R., WOLYNSKI, A., PIROTTI, F., MAISTRELLI, F., SAVULESCU, I., WURPILLOT-LUCAS, S., KARLSSON, S., ZIEBA-KULAWIK, K., STREJCZEK-JAZWINSKA, P., MOKROŠ, M., FRANZ, S., KREJCI, L., HAIDU, I., NILSSON, M., WEZYK, P., CATANI, F., CHEN, Y.-Y., LUYSSAERT, S., CHIRICI, G., CESCATTI, A., BECK, P.S.A., 2020. A spatially explicit database of wind disturbances in European forests over the period 2000–2018. *Earth Syst Sci Data* 12, 257–276.

GÓMEZ-APARICIO, L., GARCÍA-VALDÉS, R., RUIZ-BENITO, P., ZAVALA, M.A., 2011. Disentangling the relative importance of climate, size and competition on tree growth in Iberian forests: implications for forest management under global change. *Global Change Biol* 17, 2400–2414.

GONZALEZ-OLABARRIA, J.R., REYNOLDS, K.M., LARRAÑAGA, A., GARCIA-GONZALO, J., BUSQUETS, E., PIQUE, M., 2019. Strategic and tactical planning to improve suppression efforts against large forest fires in the Catalonia region of Spain. *Forest Ecology and Management*.

LECINA-DIAZ, J., MARTÍNEZ-VILALTA, J., ALVAREZ, A., BANQUÉ, M., BIRKMANN, J., FELDMEYER, D., VAYREDA, J., RETANA, J., 2020. Characterizing forest vulnerability and risk to climate-change hazards. *Front Ecol Environ*.

LINDNER, M., FITZGERALD, J.B., ZIMMERMANN, N.E., REYER, C., DELZON, S., MAATEN, E. VAN DER, SCHELHAAS, M.-J., LASCH, P., EGGERS, J., MAATEN-THEUNISSEN, M. VAN DER, SUCKOW, F., PSOMAS, A., POULTER, B., HANEWINKEL, M., 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J Environ Manage* 146, 69–83.

MEDECC, 2020. Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France.

MINA, M., BUGMANN, H., CORDONNIER, T., IRAUSCHEK, F., KLOPCIC, M., PARDOS, M., CAILLERET, M., BRANDO, P., 2016. Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. *J Appl Ecol* 54, 389–401.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A., AMEZTEGUI, A., CÁCERES, M.D., DE-MIGUEL, S., LEFÈVRE, F., BROTONS, L., COLL, L., 2020. Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosyst Serv* 45, 101174.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A., RAMSAUER, J., COLL, L., BROTONS, L., AMEZTEGUI, A., 2021. Ecosystem services provision by Mediterranean forests will be compromised above 2°C warming. *Global Change Biol.*

PINILLOS, M.S., 2014. Assessing forest response-type diversity to natural disturbances in Peninsular Spain and the Balearic Islands = Evaluación de la diversidad de tipos de respuesta a perturbaciones naturales en la España peninsular e Islas Baleares.

PIQUÉ, M., BELTRÁN, M., VERICAT, P., 2012. Modelos de gestión para montes de pino negro (*Pinus nigra* Arn.). Centro de la Propiedad Forestal. Centro de la Propiedad Forestal.

PIQUÉ, M., VALOR, T., CASTELLNOU, M., PAGÈS, J., LARRAÑAGA, A., MIRALLES, M., CERVERA, T., 2011. Integració del risc de grans incendis forestals en la gestió forestal. Centre de la Propietat Forestal.

REGOS, A., AQUILUÉ, N., LÓPEZ, I., CODINA, M., RETANA, J., BROTONS, L., 2016. Synergies Between Forest Biomass Extraction for Bioenergy and Fire Suppression in Mediterranean Ecosystems: Insights from a Storyline-and-Simulation Approach. *Ecosystems* 19, 786–802.

REGOS, A., AQUILUÉ, N., RETANA, J., CÁCERES, M.D., BROTONS, L., 2014. Using unplanned fires to help suppressing future large fires in mediterranean forests. *Plos One* 9, e94906. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094906>

SÁNCHEZ-PINILLOS, M., DE CÁCERES, M., AMEZTEGUI, A., COLL, L., 2019. Temporal dimension of forest vulnerability to fire along successional trajectories. *J Environ Manage* 248, 109301.

SÁNCHEZ-PINILLOS, M., DE CÁCERES, M., CASALS, P., ALVAREZ, A., BELTRÁN, M., PAUSAS, J.G., VAYREDA, J., COLL, L., 2021. Spatial and temporal variations of overstorey and understorey fuels in Mediterranean landscapes. *Forest Ecol Manag* 490, 119094.

SÁNCHEZ-PINILLOS, M., COLL, L., DE CÁCERES, M., AMEZTEGUI, A., 2016. Assessing the persistence capacity of communities facing natural disturbances on the basis of species response traits. *Ecol Indic* 66, 76–85.

SEIDL, R., HONKANIEMI, J., AAKALA, T., ALEINIKOV, A., ANGELSTAM, P., BOUCHARD, M., BOULANGER, Y., BURTON, P.J., GRANDPRÉ, L.D., GAUTHIER, S., HANSEN, W.D., JEPSEN, J.U., JÖGISTE, K., KNEESHAW, D.D., KUULUVAINEN, T., LISITSYNA, O., MAKOTO, K., MORI, A.S., PURESWARAN, D.S., SHOROHVA, E., SHUBNITSINA, E., TAYLOR, A.R., VLADIMIROVA, N., VODDE, F., SENF, C., 2020. Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems. *Ecography* 43, 967–978.

SENF, C., SEIDL, R., 2021. Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability* 4, 63–70.