



Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 49(2): 77-100 (2023)  
Doi: <https://doi.org/10.31167/csef.v0i49.19938>

**Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales**

Acceso abierto disponible en <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index>

Conferencias y Ponencias del 8º Congreso Forestal Español

---

## **Retos selvícolas para afrontar la adaptación de los bosques al cambio climático**

### **Adapting forests to climate change: main challenges**

Coll, L.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agraria (DCEFA),  
Universitat de Lleida, Lleida*

<sup>2</sup>*Joint Research Unit CTFC-AGROTECNIO-CERCA, Solsona*

\* Autor de correspondencia: [lluis.coll@udl.cat](mailto:lluis.coll@udl.cat)

## Resumen

El gestor forestal se enfrenta al desafío de tener que adaptar sus prácticas a un contexto de creciente incertidumbre ambiental, motivado por el cambio climático y las alteraciones en los regímenes de perturbaciones. El artículo repasa brevemente el concepto de gestión forestal adaptativa y las fases que componen este tipo de procesos. A continuación, identifica algunas líneas estratégicas de actuación a las que puede acogerse el gestor forestal para promover la progresiva adaptación de las masas al cambio climático y reforzar su resiliencia. Finalmente, remarca la importancia de monitorear adecuadamente la respuesta de las masas a los tratamientos ejecutados para poder evaluar, en base a ello, su pertinencia para la consecución de los objetivos perseguidos. Además, aboga por continuar estableciendo nuevas parcelas de seguimiento y ensayos y exprimir el potencial de las nuevas tecnologías y de los avances existentes en materia de análisis de datos y modelización para el ajuste y mejora de la práctica selvícola y de la planificación forestal.

**Key words:** *selvicultura adaptativa, cambio climático, perturbaciones forestales, resiliencia, monitoreo, nuevas tecnologías.*

## Summary

The article briefly addresses the concept of adaptive forest management and describes the different stages of any adaptive management system. It then identifies strategic management actions that can be undertaken to promote the progressive adaptation of forests to climate change and enhance their resilience to future disturbance regimes. Finally, it emphasizes the need for adequately monitoring the response of the stands to the implemented treatments in order to evaluate their relevance in achieving to reach the predefined management goals. Additionally, the article advocates for the continued establishment of forest plots and field experiments as well as harnessing the potential of new technologies and take advantage of recent advances in data management and modelling to improve current forest management strategies.

**Palabras clave:** *adaptive silviculture, climate change, forest disturbances, resilience, monitoring, new technologies.*

---

## 1. Introducción

Los sistemas forestales proveen múltiples bienes y servicios a la sociedad y, por tanto, juegan un papel clave en su bienestar. Como todos los sistemas naturales, los bosques se encuentran en constante evolución, siendo la cuenca Mediterránea una de las regiones del mundo donde dicha evolución se ha visto, históricamente, asociada de forma más íntima a la acción antrópica (Nocentini y Coll, 2013). Las últimas décadas no han sido una excepción. Así, el progresivo éxodo rural que se dio en España y el abandono, con ello, de los usos tradicionales del monte han motivado importantes dinámicas de expansión de formaciones arboladas sobre antiguos cultivos y de densificación de aquellos preexistentes (Ameztegui *et al.*, 2010, Gelabert *et al.*, 2022). Como consecuencia de ambos procesos y de la intensa actividad repobladora de mediados del siglo pasado (unido a la escasez e insuficiencia de tratamientos selvícolas en estas masas) (Serrada, 2017), los paisajes actuales presentan extensas superficies boscosas continuas, densas y poco diversas (*Fig. 1*).



**Figura 1.** Antiguos campos de cultivo colonizados espontáneamente por pino silvestre en la Serra de Prades (Tarragona).

*Foto:* Pau Vericat - Arxiu AGS-CTFC.

Actualmente la superficie arbolada continúa incrementándose, a un ritmo anual del 1,3% desde 1990 (casi 185.000 ha/año), lo que representa la tasa anual de cre-

cimiento mayor de todos los países de la Unión Europea (Bravo *et al.*, 2017). Ello está comportando mayores niveles de consumo de agua por parte del bosque y una reducción del agua drenada y de escorrentía (Sabaté *et al.*, 2015). En paralelo, los bosques ibéricos sufren las consecuencias derivadas del actual contexto de calentamiento global. El incremento progresivo de la temperatura y la concurrencia, cada vez más frecuente, de períodos de calor y sequía extremos han promovido (y continuarán promoviendo) episodios graves de estrés hídrico en las masas forestales, siendo frecuente la aparición de fenómenos activos de decaimiento en aquellas localizadas en las peores estaciones (Vilà-Cabrera *et al.*, 2013). Además, la pérdida de vigor que manifiestan algunas masas forestales incrementa su vulnerabilidad frente a plagas y patógenos (Pureswaran *et al.*, 2018, Jaime *et al.*, 2022), cuyos daños puede llegar a comprometer, en algunos casos, su persistencia (Caballol *et al.*, 2022) (*Fig. 2*).



**Figura 2.** Masas de pino laricio afectadas por un brote de *Diplodia sapinea* en el Prepirineo catalán (Navès, Lleida).

*Foto:* Lluís Brotons.

Finalmente, el aumento de la aridez ambiental (y, con ello, la disminución en la humedad de la vegetación) unido a la ya mencionada expansión y densificación del bosque (que ha conllevado un incremento de la cantidad y continuidad del combus-

tible) y al aumento de la energía disponible en la atmósfera facilita la ocurrencia de grandes incendios forestales (Duane *et al.*, 2021), algunos de ellos de comportamiento extremo y que generan graves impactos ambientales y sociales (Fig. 3).



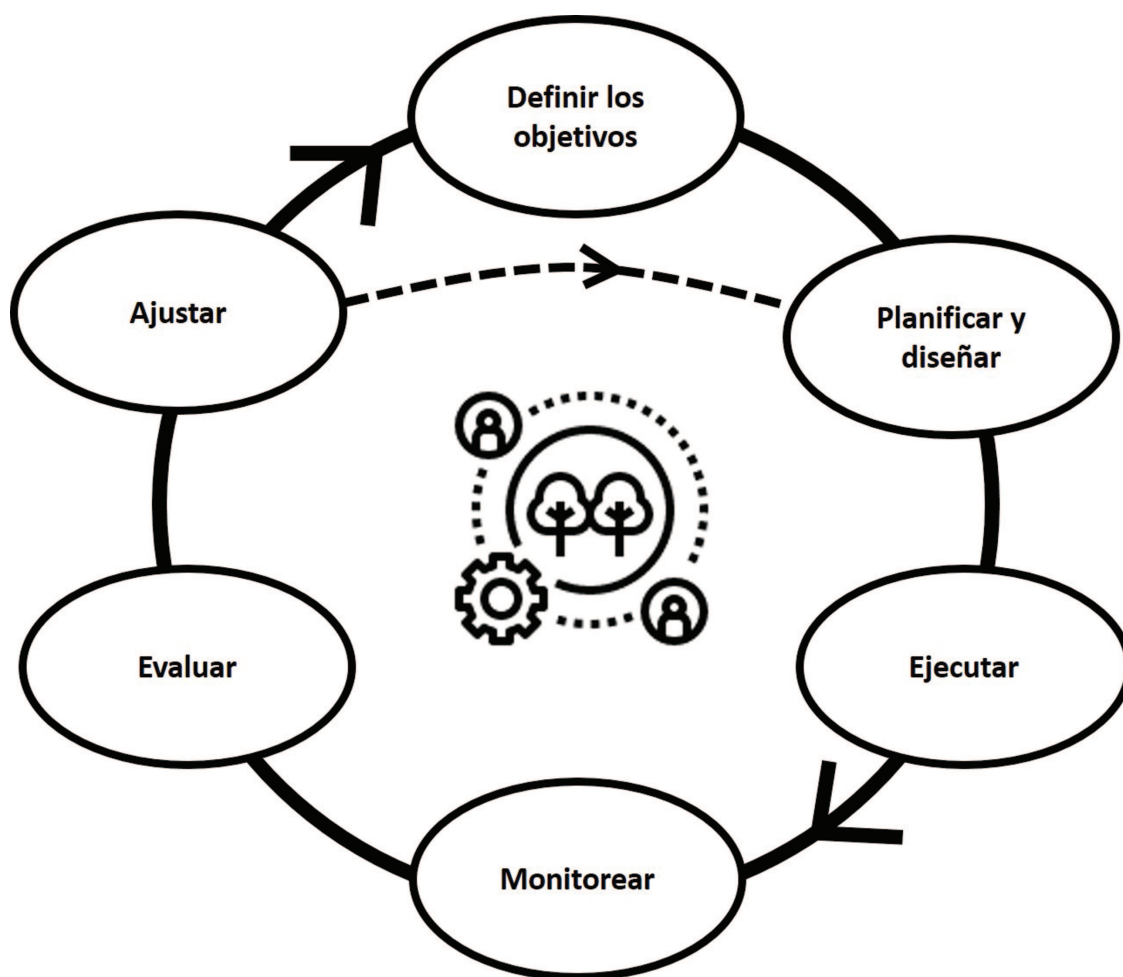
**Figura 3.** Detalle del pyrocumulonimbus formado en el incendio de julio de 2021 de Santa Coloma de Queralt (Tarragona) (izquierda) y consecuencias de su colapso sobre las masas de pino carrasco (derecha).

Foto: Rubén Hoz (izq.); Andrea Duane (der.).

En la actualidad, el gestor forestal se enfrenta al desafío de tener que adaptar sus prácticas al presente contexto de cambio y de creciente incertidumbre ambiental para, con ello, continuar dando respuesta a las demandas de bienes y servicios que la sociedad exige. El desafío es mayúsculo, dado el desconocimiento existente sobre si las condiciones ambientales futuras permitirán la persistencia de muchas especies en las mismas estaciones en las que se han desarrollado durante generaciones. A ello hay que añadir la incertidumbre acerca del papel que desempeñarán las perturbaciones bióticas o abióticas (cuyos regímenes se están viendo alterados) en la futura dinámica de estos bosques (Coll, 2014).

## 2. ¿Gestión forestal adaptativa o gestión para la adaptación al cambio climático?

El término *gestión forestal adaptativa* se utiliza habitualmente para hacer referencia a la planificación y diseño de actuaciones que persiguen mejorar la adaptación de las masas forestales al nuevo contexto climático. El uso del término en este sentido es erróneo dado que la puesta en marcha de estrategias de gestión adaptativa va más allá de la selección e implementación de actuaciones y ensayos. Los procesos adaptativos incluyen también el monitoreo y evaluación del resultado de las prácticas ejecutadas y el ajuste e incorporación (en base a ello) de mejoras en futuras intervenciones (Fig. 4).



**Figura 4.** Representación esquemática de las distintas etapas que conforman un proceso cíclico de gestión adaptativa.

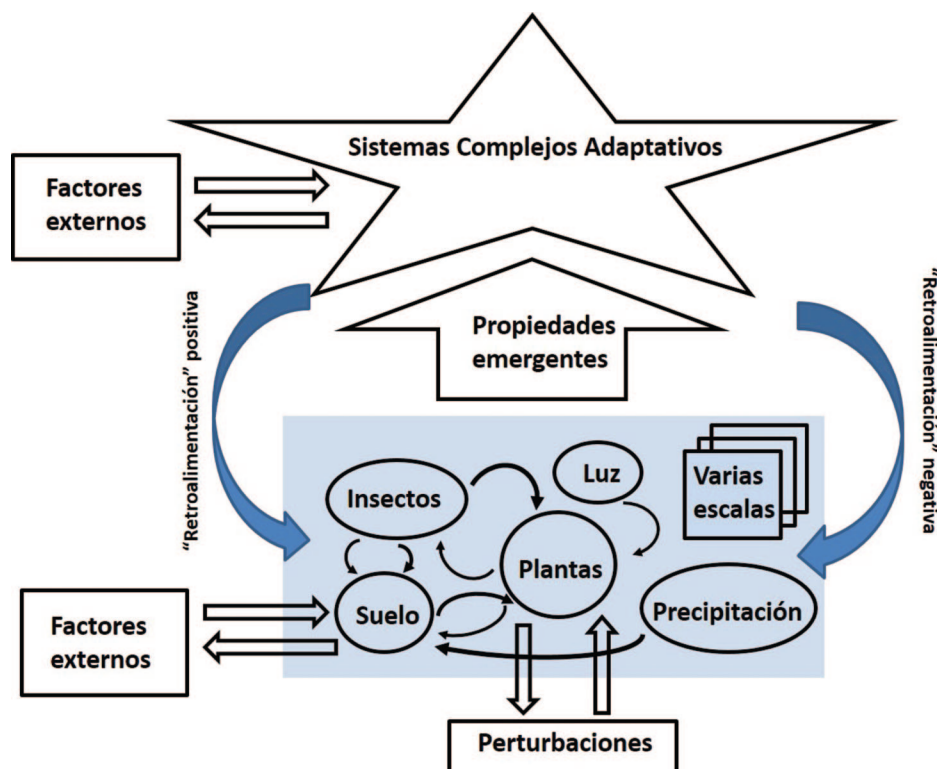
Icono: freeicons.io

La gestión forestal adaptativa es, por tanto, un proceso cíclico de aprendizaje (Bravo *et al.*, 2008). A lo largo de los años, el gestor forestal ya ha venido incorporado, en el ejercicio de su profesión, procedimientos adaptativos de base empírica, ajustando e incorporando mejoras en la planificación y ejecución de tratamientos selvícolas en base a los resultados obtenidos en el pasado. El conocimiento de la práctica forestal se ha transmitido, habitualmente, entre distintas generaciones de gestores dado que la escala temporal a la que opera el gestor es mucho más corta de aquella a la que lo hace el bosque. En la actualidad, la rapidez con la que se están produciendo los cambios de tipo ambiental y socioeconómico mencionados anteriormente, exige al gestor el diseño y propuesta de nuevas prácticas silvícolas basadas no sólo en el conocimiento adquirido a través de generaciones sino en la consideración de distintos escenarios de futuro. Además, la ocurrencia cada vez más frecuente de eventos de comportamiento extremo, pone de manifiesto la necesidad de reforzar en la práctica de la silvicultura el objetivo de promover la resiliencia de las

masas (su capacidad de recuperación) asumiendo que incluso aquellas a priori más estables o resistentes (producto muchas veces de una adecuada gestión anterior), pueden resultar severamente afectadas. Se trata de aceptar e incorporar la incertidumbre en la práctica forestal, lo que conlleva, en cierta manera, a la necesidad de flexibilizar la programación y el tipo de actuaciones (García-Güemes y Calama, 2015). A continuación, se identifican y describen algunas líneas estratégicas de actuación sobre los que puede incidir el gestor forestal para reforzar la capacidad de adaptación de las masas forestales al nuevo contexto de incertidumbre ambiental. Obviamente, el contexto socio-ambiental particular bajo el cual se desarrollen las masas forestales determinará la pertinencia de la aplicación de cada una de ellas.

### 2.1. Promover la heterogeneidad de las masas arboladas

Los bosques exhiben la mayor parte de características de los sistemas adaptativos complejos (Filotas *et al.*, 2014). Así, son sistemas formados por múltiples elementos individuales que interactúan y se retroalimentan constantemente a distintas escalas espaciales y temporales (siguiendo relaciones no lineales). Como en todos los sistemas adaptativos complejos, el resultado de las múltiples interacciones se traduce en la emergencia de patrones y comportamientos que confieren al bosque la capacidad de adaptarse al cambio y de auto-organizarse tras el paso de una perturbación (Fig. 5).



**Figura 5.** Diagrama simplificado que muestra los bosques bajo el prisma de los sistemas complejos adaptativos (modificado de Puettmann (2011) en Coll (2014)).

Incrementar la complejidad del sistema forestal promoviendo la heterogeneidad composicional y estructural de las masas y de los paisajes forestales resulta una actuación de gran interés para mejorar su resiliencia frente a perturbaciones cuyos regímenes se verán afectados por el cambio climático. Por ejemplo, se ha comprobado que niveles altos de diversidad específica y estructural a escala de rodal dificultan la expansión de episodios de decaimiento asociados a enfermedades o plagas (Jactel *et al.*, 2009). De modo similar, se ha observado que la diversidad de estructuras, especies y morfotipos presentes en un bosque disminuyen, en general, los daños asociados a episodios de sequía extremos (Galiano *et al.*, 2010; Linares *et al.*, 2010; Pardos *et al.*, 2021).



**Figura 6.** Masa mixta de robles y encinas, con presencia esporádica de frondosas y pinos de grandes dimensiones en la que se realizaron tratamientos de regulación de competencia alrededor de pies seleccionados en base a criterios de especie, tamaño, calidad de la madera y biodiversidad en el marco del proyecto LIFE MixForChange (Massís del Montnegre, Barcelona).

*Foto:* Arnau Soler - LIFE MixForChange.

La herramienta de la que dispone el gestor para promover la heterogeneidad de especies y estructuras a nivel de rodal y de paisaje es la apertura de huecos de diferentes tamaños (Bravo-Oviedo *et al.*, 2022) y la ejecución de tratamientos de regulación de la competencia (claras, claros y resalvos) (Martín-Alcón *et al.*, 2017; Collado *et al.*, 2022). En sistemas muy simplificados, es pertinente tratar de mantener la diversidad fenotípica del rodal (a nivel de rasgos morfológicos o fenológicos) y también puede recurrirse a la ejecución de plantaciones de diversificación (Martín-



Alcón *et al.*, 2016a). El diseño y el peso de los tratamientos selvícolas dependerá del temperamento y de las especies y estructuras que se pretenda favorecer. No se trata de diversificar por diversificar, sino de diversificar con criterios y objetivos claros. Más allá de la riqueza de especies, lo que resulta relevante en términos de adaptación al cambio climático es aumentar la diversidad de rasgos funcionales del rodal (Sánchez-Pinillos *et al.*, 2016; Messier *et al.*, 2019). Por ejemplo, promover la progresiva diversificación de pinares monoespecíficos con especies de quercíneas puede resultar clave para el rápido recubrimiento del suelo por la vegetación tras un incendio, dada la capacidad de estas últimas de rebrotar (Martín-Alcón *et al.*, 2016b).

En los últimos años se han desarrollado numerosas iniciativas y proyectos de investigación y de transferencia del conocimiento centrados en el estudio de las masas mixtas y el desarrollo de una selvicultura orientada hacia la promoción y mantenimiento de estas tipologías (Bravo-Oviedo y Peinado, 2017; Muñoz-Gálvez *et al.*, 2022; Collado *et al.*, 2022; Del Rio *et al.*, 2022) (*Fig. 6*). Ello ha dado lugar a notables avances en el conocimiento de su dinámica, funcionamiento y gestión (ver revisión en Coll *et al.*, 2018) que se han visto reflejados en artículos científicos y manuales técnicos recientes y de evidente interés (Bravo-Oviedo *et al.*, 2018; Coello *et al.*, 2022, entre otros).

## 2.2. Potenciar el vigor de las masas forestales

Promover la vitalidad de las masas forestales resulta clave para reducir su susceptibilidad (*sensu* Lecina *et al.*, 2021) frente a los efectos adversos del cambio climático y de las perturbaciones forestales. Este objetivo puede abordarse mediante la ejecución de tratamientos selvícolas de dosificación de competencia, mejorando con ello la disponibilidad hídrica de los árboles (*Fig. 6*) (del Campo *et al.*, 2022; Cabon *et al.*, 2018). En esta línea se están llevando a cabo trabajos experimentales de gran interés y con resultados prometedores en masas de pino carrasco densas y con crecimientos estancados como consecuencia de su origen y la falta de gestión forestal (Manrique-Alba *et al.*, 2020).

En montes bajos envejecidos y de elevada espesura localizados en estaciones de cierta calidad, puede potenciarse el futuro vigor de los tallares mediante tratamientos de conversión a monte alto, promoviendo el rejuvenecimiento de las masas a través del fomento de la fructificación y la regeneración sexual de las masas (Vericat y Piqué, 2012; Arrechea *et al.*, 2015; Mundet *et al.*, 2018). Finalmente, en formaciones de montaña se ha apuntado a la aplicación de una selvicultura de base naturalística (de árbol individual, con intervenciones ligeras pero frecuentes y centrada en favorecer y aprovechar los procesos naturales del bosque) como una opción de gran interés para promover la persistencia y vitalidad de estos bosques (Beltrán *et al.*, 2020).

## 2.3. Promover cambios de estructura o especies

En aquellas masas cuya especie principal muestre signos de decaimiento activo



**Figura 7.** Apertura de franjas para la mejora del estado hídrico de masas de pino carrasco de la Cataluña Central (Castellgalí, Barcelona) realizadas en el marco del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (arriba). Actuaciones de regulación de competencia intracepa en masas mixtas de castaño, encina y robles marcescentes realizadas en el marco del proyecto LIFE MixForChange en el Massís del Montnegre (Barcelona) (abajo).

*Foto:* Lluís Coll (arriba) y Arnau Soler - LIFE MixForChange (abajo).



o niveles de mortalidad importantes derivados de la creciente aridez ambiental (o del efecto conjunto de la sequía y de la acción de plagas y patógenos), puede promoverse la aceleración de cambios de estructura y composición potenciando el desarrollo de aquellas especies presentes en el rodal que muestren, a priori, una mayor capacidad de adaptación al futuro contexto ambiental. Ello concierne, en particular, a las masas dominadas por especies que se localizadas en los límites meridionales de su distribución (principalmente en el caso de especies eurosiberianas) (Sánchez-Salguero y Navarro-Cerrillo, 2015; Camarero et al., 2021). La progresiva sustitución de la especie principal se conseguirá tras un cuidadoso señalamiento y la ejecución de claras selectivas que liberen de competencia y fomenten el desarrollo y vigor de las especies deseadas. En aquellos casos en las que no se encuentren presentes especies secundarias de interés o en rodales presentando problemas de regeneración natural en los que quiera preservarse la cubierta arbórea, puede recurrirse al establecimiento artificial de especies, para cuya elección deberá tenerse en cuenta el rango de condiciones ambientales futuras. Eventualmente podría recurrirse al establecimiento de procedencias o especies propias de ámbitos más cálidos o séricos (migración asistida) (Williams y Dumroese, 2013), una actuación sujeta a debate (Aubin et al., 2011) y que no es garantía de éxito ni está exenta de riesgo (Mueller y Hellmann, 2008).

Finalmente, la ocurrencia de perturbaciones naturales, como los incendios, ofrece al bosque la posibilidad de reorganizarse y, a través de ello, de evolucionar hacia unas tipologías composicionales y estructurales más adaptadas a los nuevos regímenes. Cuando fuere necesaria la ejecución de actuaciones de restauración forestal, se podrá potenciar la futura adaptabilidad de las masas mediante la elección de especies que presenten mecanismos de respuesta frente a perturbaciones (como la capacidad de rebrote) y una adecuada tolerancia a las futuras condiciones climáticas (Pausas *et al.*, 2004; Santana *et al.*, 2018).

#### *2.4. Reducir la vulnerabilidad frente a incendios forestales*

Los incendios forestales son la principal perturbación que afecta los bosques del área mediterránea. Como se ha comentado brevemente en la introducción del artículo, en las últimas décadas la acción conjunta de distintos componentes de tipo socio-económico y ambiental ha promovido un cambio en el comportamiento de los incendios, con la aparición cada vez más frecuente de incendios impredecibles y de comportamiento extremo. Estos incendios resultan muy difíciles de apagar (superan en muchos casos la capacidad de extinción) y ponen en riesgo el patrimonio natural, así como bienes materiales e incluso vidas humanas (Moreira *et al.*, 2020). A grandes rasgos, el comportamiento del fuego viene condicionado por tres factores: la meteorología, la topografía y el combustible. El gestor forestal puede únicamente modificar el último de ellos para intentar que el incendio propague a menor intensidad. A nivel de rodal, puede actuarse sobre el estrato arbustivo para disminuir la carga de combustible mediante desbroces mecánicos, la acción del ganado y la aplicación de quemas prescritas (Fernandes *et al.*, 2022). También puede actuarse sobre la continuidad vertical del combustible, mediante claras por lo bajo, podas o

desbroces (para dificultar la transición del fuego de la superficie a las copas) y sobre la continuidad horizontal reduciendo densidades para dificultar la transición del fuego por las copas (Piqué *et al.* 2013). Obviamente, motivos económicos (y técnicos) impiden la aplicación de esta selvicultura preventiva a gran escala, por lo que resulta necesario disponer de una adecuada identificación de áreas prioritarias de gestión en las que optimizar una planificación espacio-temporal de combustibles e infraestructuras que limite la potencialidad del incendio (ver Madrigal *et al.*, 2019). Si bien queda aún mucho camino por recorrer en el ámbito de la selvicultura preventiva, adaptar nuestro patrimonio forestal frente a la nueva era de incendios requiere de la puesta en marcha de acciones que operan a escalas superiores y la implementación de estrategias de gestión del paisaje (y del territorio) que trascienden el ámbito de actuación del gestor forestal. La gestión del propio incendio, por ejemplo, puede representar una oportunidad para mejorar la futura resiliencia de los paisajes y acotar, hasta cierto punto, el alcance de futuros incendios (Castellnou *et al.*, 2010; North *et al.*, 2015). En cualquier caso, promover paisajes resilientes frente incendios pasa, inexorablemente, por el reconocimiento social del papel que juega el sector rural en la protección y mantenimiento del patrimonio forestal y, en consecuencia, por una apuesta fuerte para el mantenimiento de una economía de base rural, capaz de mantener un mosaico agrícola forestal activo y dinámico (Bertomeu *et al.*, 2022).

### **3. Herramientas para el monitoreo y la evaluación de las actuaciones**

Una etapa clave de los procesos de gestión forestal adaptativa es el monitoreo y evaluación de las actuaciones realizadas para la consecución de un determinado (o varios) objetivo (*ver figura 4*). Ello debe permitir ajustar y mejorar las prácticas, cuando fuere necesario y, eventualmente, redefinir los objetivos si el contexto socioambiental en el marco del cual se definieron ha cambiado. A continuación, se revisan, brevemente, los recursos y herramientas principales a las que puede recurrir el gestor forestal para llevar a cabo estas fases de monitoreo, evaluación y ajuste de la gestión forestal adaptativa.

#### *3.1. Parcelas de seguimiento y ensayos*

El establecimiento de parcelas y ensayos para el monitoreo a corto, medio y largo plazo de la respuesta del bosque frente a distintas actuaciones resulta fundamental para la adecuada evaluación de la pertinencia de estas actuaciones para la consecución de los objetivos planteados. Además de la red de parcelas experimentales permanentes establecidas por el CIFOR-INIA hace décadas (Montero González *et al.*, 2004), a lo largo de los años se han establecido multitud de parcelas y ensayos en distintas formaciones arboladas mediterráneas que han generado conocimiento de gran relevancia relacionado con prácticas de adaptación al cambio climático (ver, por ejemplo, Molina *et al.*, 2021a). Entre ellas, parcelas establecidas

en el marco de trabajos sobre selvicultura ecohidrológica (del Campo *et al.*, 2019; Molina *et al.*, 2021b), quemas prescritas (Valor *et al.*, 2017) (*Fig. 8*), técnicas de restauración post-incendio (García Díaz *et al.*, 2022) o actuaciones de diversificación de pinares (Martín-Alcón *et al.*, 2016a).



**Figura 8.** Rodal experimental de pino laricio en el que se realizó una quema prescrita en Miravé (Pinell, Lleida) por parte del *Grupo de Actuaciones Forestales* (GRAF) del cuerpo de bomberos de la Generalitat de Catalunya.

*Foto:* Pere Casals.

Si bien resulta evidente la conveniencia de continuar implementando ensayos y parcelas de seguimiento en estos campos, debe incidirse sobre la necesidad de procurar mantener el seguimiento de estos dispositivos en el tiempo, hecho que no re-

sulta fácil en el marco actual de financiamiento cortoplacista de la actividad investigadora.

### 3.2. *Macrobases de datos*

Además de la puesta en práctica de nuevas experimentaciones y ensayos, se dispone de excelentes bases de datos forestales cuyo análisis ha permitido avanzar en el monitoreo y la comprensión de los factores que rigen la dinámica y el funcionamiento de nuestros bosques. Entre ellas destaca el inventario forestal nacional (IFN), ideado en los años 60 y actualmente en su cuarta edición, que ha aportado datos de gran interés para la definición de estrategias de gestión para la adaptación de los bosques al cambio climático (Alberdi *et al.*, 2016). Así, el análisis de los datos del IFN ha generado información de gran interés para la gestión forestal acerca de la distribución de las principales especies arbóreas y arbustivas (y del papel potencial que tendrá el cambio climático sobre ellas) (García-Valdés *et al.*, 2013), de la capacidad de almacenamiento de carbono de los montes (Vayreda *et al.*, 2012) y de la vulnerabilidad de las masas frente a incendios forestales (Sánchez-Pinillos *et al.*, 2021), entre muchas otras materias (ver Ruíz-Benito y García-Valdés, 2016). De modo complementario al IFN, las bases de datos generadas en el marco de las Redes Europeas de Seguimiento de Bosques (de varias décadas de existencia) proveen indicadores sobre el estado de salud y vitalidad de los bosques y sobre su relación con distintos factores de estrés (Michel *et al.*, 2020). Los significativos avances producidos en los últimos años en el campo de la gestión y análisis de grandes bases de datos permiten en la actualidad exprimir todo su potencial, así como el de otras existentes a nivel global, (ver por ejemplo <https://gfbinitiative.net/>). No obstante, es importante ser consciente de las limitaciones inherentes a estas grandes bases de datos (muy útiles a la hora de establecer patrones y definir indicadores, pero menos pertinentes para el análisis de los mecanismos subyacentes a ellos). Finalmente, debe incidirse siempre sobre la necesidad de transferir adecuadamente los resultados derivados su análisis al sector forestal y a la sociedad en general.

### 3.3. *Nuevas tecnologías*

El creciente desarrollo de nuevas tecnologías y su aplicación en el ámbito forestal ha supuesto un gran avance para las actividades de monitoreo y evaluación de la dinámica forestal y una herramienta de gran interés para la gestión y la planificación forestal (ver revisión de Gómez *et al.*, 2019). La disponibilidad de información procedente de sensores remotos ha incrementado enormemente gracias a continuos avances técnicos tanto en sensores activos (i.e. GEDI Mission-LiDAR, SAR) como pasivos (i.e. Sentinel-2, Landsat), técnicas de análisis digital (i.e. algoritmos machine-learning), y en general, mejores resoluciones espectrales, espaciales y temporales (Zhu *et al.*, 2018). Ello ha permitido, por ejemplo, poder abordar a nivel regional los procesos de recuperación de la vegetación tras incendio (e.g. Viana-Soto *et al.*, 2017; Marino *et al.*, 2017). Los últimos años también atestiguan un desarrollo exponencial de las aplicaciones basadas en LiDAR para la caracterización de la di-

námica y funcionamiento de los bosques, en combinación con datos inventariales de campo (Liang *et al.*, 2016, White *et al.*, 2016) o con imágenes aéreas o satelitales (Martín-Alcón *et al.*, 2015). El desarrollo reciente del algoritmo LandTrendr (Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery; Kennedy *et al.*, 2010) ha supuesto asimismo un hito importante en el análisis de series temporales, de enorme potencial para el estudio, por ejemplo, de los determinantes de los cambios en los usos del suelo y las perturbaciones en la dinámica vegetal (Gelabert *et al.*, 2021, Bright *et al.*, 2019).

### 3.4. Modelos y simuladores

El uso de modelos de dinámica forestal (y en particular aquellos mecanísticos o híbridos) presentan una gran relevancia en un contexto de gestión forestal adaptativa (Fontes *et al.*, 2010). Dada la escala temporal a la que operan las especies arbóreas (acorde con su longevidad), la capacidad de los modelos para proyectar en el tiempo su respuesta frente a distintas actuaciones selvícolas y bajo distintos escenarios climáticos resulta fundamental para las fases de evaluación y ajuste de los procesos adaptativos. Existen numerosas aplicaciones de modelos forestales orientadas a mejorar la gestión y planificación de nuestros montes (ver Bravo *et al.*, 2011; 2019; Blanco *et al.*, 2020). A título de ejemplo, se han utilizado modelos de simulación de la dinámica forestal a nivel del rodal para evaluar, bajo distintos escenarios climáticos, los efectos de claras de distinto peso sobre la productividad y el balance hídrico en masas de pino silvestre (Ameztegui *et al.*, 2017). A escalas superiores, también se han utilizado modelos forestales para evaluar el papel de diferentes itinerarios selvícolas en la provisión de servicios ecosistémicos bajo distintos escenarios de cambio global (Moran-Ordóñez *et al.*, 2020) o para simular cómo el uso del agua y el estrés hídrico varían en función de la composición y la estructura de las masas forestales (De Cáceres *et al.*, 2021). El uso de modelos de comportamiento del fuego o de dinámica de la vegetación que incorporan información sobre regímenes de incendios (ver Brotons *et al.*, 2013) también pueden aportar conocimiento de gran interés sobre la eficacia de distintos métodos de control del combustible como las quemas prescritas a escalas de rodal (Piqué y Domènech, 2018) o de paisaje (Duane *et al.*, 2019). En cualquier caso, para que el uso de modelos forestales tenga un impacto real en la definición de estrategias de gestión forestal es necesario que su uso trascienda al gestor y al ámbito de la planificación. Aunque queda camino por recorrer en este ámbito, la puesta en marcha de plataformas de simulación como SIMANFOR (Bravo *et al.*, 2012) y el creciente desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (Cristal *et al.*, 2019; Pérez-Romero *et al.*, 2022, entre otros) constituyen buenos ejemplos en este sentido.

## 4. Conclusión

El contexto de alta incertidumbre ambiental en el que se desarrollarán los sistemas forestales requiere de la incorporación, en la práctica selvícola, de actuación-

nes que promuevan su adaptación y resiliencia frente al cambio climático y a los nuevos regímenes de perturbaciones derivados. En este sentido, resulta pertinente la ejecución de tratamientos selvícolas orientados a promover la heterogeneidad y vitalidad de los bosques, facilitando la incorporación de especies con distintos rasgos funcionales (para incrementar las oportunidades de emergencia de respuestas adaptativas) y mejorando el estado hídrico de los individuos. También debe contemplarse facilitar la sustitución de la especie principal (cuando se encuentre en sus límites climáticos de distribución y muestre evidentes signos de decaimiento) por otras especies secundarias que exhiban mayor capacidad de adaptación al futuro contexto ambiental y la puesta en práctica de actuaciones de restauración forestal que incidan sobre la futura resiliencia del sistema (en los procesos de selección y disposición de las especies en el área afectada).

Reducir los impactos potenciales de los nuevos regímenes de incendios, de comportamiento más extremo, requiere de la puesta en marcha de actuaciones que vayan más allá de la ejecución de tratamientos preventivos a nivel de rodal. Así, son necesarias políticas que apuesten decididamente por una economía de base rural que mantenga paisajes heterogéneos y con baja carga y continuidad de combustible. También se percibe la oportunidad de aprovechar el alto conocimiento disponible en materia de comportamiento del fuego para incrementar el uso del fuego prescrito (aún bastante anecdótico) y gestionar algunos incendios de comportamiento predecible en aras de crear paisajes más adaptados a los nuevos regímenes.

Finalmente, en todo proceso de gestión adaptativa es fundamental el monitoreo y evaluación de las prácticas realizadas. Es por ello que hay que continuar estableciendo ensayos y parcelas experimentales y realizar un esfuerzo para transmitir adecuadamente al gestor forestal la información que se derive de ellas y del uso de nuevas tecnologías en el ámbito forestal.

## **Agradecimientos/Financiación**

El autor quiere expresar su agradecimiento a Álvaro Aunós por la relectura crítica del manuscrito y por las discusiones mantenidas sobre su contenido. También quiere agradecer a Pau Vericat, Lluís Brotons, Rubén Hoz, Andrea Duane, Pere Casals, Teresa Valor, Mario Beltrán y Arnau Soler (proyecto LIFE MixForChange) la cesión de material fotográfico para ilustrar algunas secciones del texto. Finalmente, se agradece la financiación recibida en el marco del proyecto UMBRACLIM (PID2019-111781RB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación y por el grupo de investigación ADAPTAFOR (2021 SGR 01530) de la Generalitat de Catalunya.

## **5. Bibliografía**

Alberdi, I.; Sandoval, V.; Condés, S.; Cañellas, I.; Vallejo, R.; 2016. The Spanish National Forest Inventory, a tool for the knowledge, management and conservation of forest ecosystems. *Ecosistemas*. 25(3), 88-97. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.10>



- Ameztegui, A.; Brotons, L.; Coll, L.; 2010. Land-use changes as major drivers of Mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Glob. Ecol. Biog.* 19 (5), 632-641. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00550.x>
- 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>
- Arrechea, E.; 2015. Los efectos de las intervenciones selvícolas en las masas de monte bajo de *Quercus pyrenaica* en los montes públicos de la Sierra del Moncayo en Aragón. In: Herretero, A., Zavala, M.A. (eds.), *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Aubin, I.; Garbe, C.M.; Colombo, S.; Drever, C.R.; Mckenney D.W.; Messier, C.; Pedlar, J.; Saner, M.A.; 2011. Why We Disagree about Assisted Migration: Ethical Implications of a Key Debate Regarding the Future of Canada's Forests. *For. Chr.* 87, 755– 65. <https://doi.org/10.5558/tfc2011-092>
- Beltrán, M.; Cano, F.; Garitacelaya, J.; Piqué, M.; 2020. Manual de gestión naturalística de los bosques de coníferas de Pirineos. Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña, Solsona. 116 p.
- Bertomeu, M.; Pineda, J.; Pulido, F.; 2022. Managing wildfire risk in mosaic landscapes: a case study on the upper Gata river catchment in Sierra de Gata. *Land.* 11(4), 465. <https://doi.org/10.3390/land11040465>
- Blanco, J.A.; Ameztegui, A.; Rodríguez, F.; 2020. Modelling forest ecosystems: a crossroad between scales, techniques and applications. *Ecol. Model.* 425, 109030. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109030>
- Bravo, F.; Bravo-Oviedo, A.; Ruiz-Peinado, R.; Montero, G.; 2008. Selvicultura y cambio climático. En: R. Serrada, G. Montero, J.A. Reque (eds.), *Compendio de selvicultura aplicada en España: 981-1003*. INIA – Fucovasa, Madrid.
- Bravo, F.; Álvarez-González, J.G.; Río, M.; Barrio, M.; Bonet, J.A.; Bravo-Oviedo, A.; Calama, R.; Castedo-Dorado, F.; Crecente-Campo, F.; Condes, S.; Diéguez-Aranda, U.; González-Martínez, S.C.; Lizarralde, I.; Nanos, N.; Madrigal, A.; Martínez-Millán, F.J.; Montero, G.; Ordóñez, C.; Palahi, M.; Piqué, M.; Rodríguez, F.; Rodríguez Soslleiro, R.; Rojo, A.; Ruiz-Peinado, R.; Sánchez-González, M.; Trasobares, A.; Vázquez-Piqué, J.; 2011. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. *For. Syst.* 20(2), 315-328. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2011202-11512>
- Bravo, F.; Rodríguez, F.; Ordóñez, C.; 2012. A web-based application to simulate alternatives for sustainable forest management: SIMANFOR. *For. Syst.* 21(1), 4-8 <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-01953>
- Bravo, F.; Guijarro, M.; Cámara, A.; Díaz Balteiro, L.; Fernández, P.; Pajares, J.A.; Pemán, J.; Ruiz Peinado, R.; 2017. La situación de los bosques y el sector forestal en España – ISFE 2017. Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Bravo, F.; Fabrika, M.; Ammer, C.; Barreiro, S.; Bielak, K.; Coll, L.; Fonseca, T.; Kangur, A.; Löf, M.; Merganicová, K.; Pach, M.; Pretzsch, H.; Stojanovic, D.; Schuler, L.; Peric, S.; Rötzer, T.; del Río, M.; Dodan, M.; Bravo-Oviedo, A.; 2019. Modelling approaches for mixed forests dynamics prognosis. Research gaps and opportunities. *For. Syst.* 28(1). <https://doi.org/10.5424/fs/2019281-14342>
- Bravo-Oviedo, A.; Ruíz-Peinado, R.; 2017. La red europea de bosques mixtos EuMIXFOR.

- oportunidades y perspectivas de gestión e investigación en masas mixtas. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 7º Congreso Forestal Español. Plasencia.
- Bravo-Oviedo, A.; Pretzsch, H.; Del Río, M.; (eds.), 2018. Dynamics, silviculture and management of mixed Forests. Springer. Series: Managing Forest Ecosystems. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9>
- Bravo-Oviedo, A.; Concepción, E.D.; Ordóñez, C.; Bravo, F.; 2022. El aclareo sucesivo irregular como opción para la diversificación de pinares monoespecíficos en el Suroeste de Europa. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 8º Congreso Forestal Español, Lleida.
- Bright, B.C.; Hudak, A.T.; Kennedy, R.E.; Braaten, J.D.; Khalyani, A.H.; 2019. Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three western North American forest types. *Fire Ecol.* 15:8. <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0021-9>
- Brotons, L.; Aquilué, N.; De Cáceres, M.; Fortin, M.J.; Fall, A.; 2013. How fire history, fire suppression practices and climate change affect wildfire regimes in Mediterranean landscapes. *PLoS One* 8(5), e62392. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062392>
- Caballol, M.; Méndez-Cartín, A.L.; Serradó, F.; De Cáceres, M.; Coll, L.; Oliva, J.; 2022. Disease in regenerating pine forests linked to temperature and pathogen spillover from the canopy. *J. Ecol.* 110(11), 2661-2672. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13977>
- Cabon, A.; Mouillot, F.; Lempereur, M.; Ourcival, J.M.; Simioni, G.; Limousin, J.M.; 2018. Thinning increases tree growth by delaying the drought-induced growth cessation in a mediterranean evergreen oak coppice. *For. Ecol. Manage.* 409, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.030>
- Camarero, J.J.; Gazol, A.; Sangüesa-Barreda, G.; Vergarechea, M.; Alfaro-Sánchez, R.; Cattaneo, N.; Vicente-Serrano, S.M.; 2021. Tree growth is more limited by drought in rear-edge forests most of the times. *For. Ecos.* 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00303-1>
- Castellnou, M.; Kraus, D.; Miralles, M.; Delogu, C.; 2010. Suppression Fire Use in Learning Organizations. In: Sande Silva, J., Rego, F., Rigolot, E., (eds.), *Towards Integrated Fire Management – Outcomes of the European Project Fire Paradox*. European Forest Institute.
- 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.
- Coll, L.; 2014. Gestión selvícola y regeneración natural ante un futuro incierto: marco teórico y principios generales. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 40, 19-32. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i40.17334>
- Coll, L.; Ameztegui, A.; Collet, C.; Löf, M.; Mason, B.; Pach, M.; Verheyen, K.; Abrudan, I.; Barbati, A.; Barreiro, S.; Bielak, K.; Bravo-Oviedo, A.; Ferrari, B.; Govedar, Z.; Kulhavy, J.; Lazdina, D.; Metslaid, M.; Mohren, F.; Pereira, M.; Peric, S.; Rasztoivits, E.; Short, I.; Spathelf, P.; Sterba, H.; Stojanovic, D.; Valsta, L.; Zlatanov, T.; Ponette, Q.; 2018. Knowledge gaps about mixed forests: what do European forest managers want to know and what answers can science provide? *For. Ecol. Manage.* 407, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.055>
- Collado, E.; Coello, J.; Beltrán, M.; Moura de Abreu, L.; Guitart, L.; Palero, N.; Vigué, V.; Rovira, J.; Piqué, M.; 2022. Gestión adaptativa y naturalística en bosques mixtos mediterráneos subhúmedos de Cataluña: caracterización de los tratamientos y evaluación selvícola. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 8º Congreso Forestal Español, Lleida.

- Cristal, I.; Ameztegui, A.; González-Olabarria, J.R.; García-Gonzalo, J.; 2019. A decision support tool for assessing the impacts of climate change on multiple ecosystem services. *Forests* 10(5), 440. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00303-1>
- 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. For. Met.* 296, 108233. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108233>
- Del Campo García, A.D.; González Sanchis, M.C.; Molina Herrera, A.J.; García-Prats, A.; Ceacero, C.J.; Bautista, I.; 2019. Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff. *For Ecol. Manage.* 438, 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.020>
- Del Campo García, A.D.; González Sanchis, M.C.; Pérez Romero, J.; Molina Herrera, A.; Blanco Cano, L.; Sánchez Moreno, I.; De La Fuente Martín, B.; 2022. La selvicultura ecohidrológica como herramienta de gestión multifuncional y adaptativa: aplicación práctica en la Sierra Norte de Madrid. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 8º Congreso Forestal Español, Lleida.
- Del Río, M.; Ruiz-Peinado, R.; Pretzsch, H.; Löf, M.; Aldea, J.; Bravo, F.; Calama, R.; Coll, L.; Ordóñez, C.; Pardos, M.; Bravo-Oviedo, A.; 2022. Transectos europeos de masas mixtas y puras: tripletes en España y principales resultados. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 8º Congreso Forestal Español, Lleida.
- Duane, A.; Aquilué, N.; Canelles, Q.; Morán-Ordoñez, A.; De Cáceres, M.; Brotons, L.; 2019. Adapting prescribed burns to future climate change in Mediterranean landscapes. *Sci. Tot. Env.* 677, 68–83. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.348>
- Duane, A.; Castellnou, M.; Brotons, L.; 2021. Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. *Clim. Chang.* 165:43. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>
- Fernandes, P.; Rigolot, E.; 2022. Prescribed burning in the European Mediterranean basin. In: Weir, J., Derek Scasta, J., (eds.), *Global application of prescribed fire*. CSIRO Publishing, pp. 176-193.
- Filotas, E.; Parrott, L.; Burton, P.J.; Chazdon, R.L.; Coates, K.D.; Coll, L.; Haeussler, S.; Martin, K.; Nocentini, S.; Puettmann, K.J.; Putz, F.E.; Simard, S.W.; Messier, C.; 2014. Viewing forests through the lens of complex systems science. *Ecosphere*. 5, 1–23. <https://doi.org/10.1890/ES13-00182.1>
- Fontes, L.; Bontemps, J.-D.; Bugmann, H.; Van Oijen, M.; Gracia, C.; Kramer, K.; Lindner, M.; Rötzer, T.; Skovsgaard, J.P.; 2010. Models for supporting forest management in a changing environment. *For. Syst.* 19, 8-29. <https://doi.org/10.5424/fs/201019S-9315>
- Galiano, L.; Martínez-Vilalta, J.; Lloret, F.; 2010. Drought-induced decline of Scots pine stands in Central Pyrenees is mediated by multiple predisposing factors. *Ecosystems*. 13, 978-991. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9368-8>
- García-Díaz M.; Lucas-Borja, M.; González-Romero, J.; Plaza-Álvarez, P.A.; Navidi, M.; Liu, Y-F.; Wu, G-L.; Zema, D.A.; 2022. Effects of post-fire mulching with straw and Wood chips on soil hydrology in pine forests under Mediterranean conditions. *Ecol. Eng.* 182, 106720.
- García-Güemes, C.; Calama, R.; 2015. La práctica de la selvicultura para la adaptación al cambio climático. In: Herrero, A.; Zavala, M.A.; (eds.), *Los Bosques y la Biodiversidad frente*

- al Cambio Climático: Impactos, vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Gelabert, P.J.; Rodrigues, M.; de la Riva, J.; Ameztegui, A.; Sebastià, M.T.; Vega-García, C.; 2021. LandTrendr smoothed spectral profiles enhance woody encroachment monitoring. *Remote Sens. Environ.* 262, 112521. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112521>
- Gelabert, P.J.; Rodrigues, M.; Vidal-Macua, J.J.; Ameztegui, A.; Vega-García, C.; 2022. Spatially explicit modeling of the probability of land abandonment in the Spanish Pyrenees. *Land. Urb. Plan.* 226, 104487. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104487>
- Gómez, C.; Alejandro, P.; Hermosilla, T.; Montes, F.; Pascual, C.; Ruiz, L.A.; Álvarez-Taboada, F.; Tanase, M.A.; Valbuena, R., 2019. Remote sensing for the Spanish forests in the 21st century: a review of advances, needs, and opportunities. *For. Syst.* 28(1).
- Jactel, H.; Nicoll, B.C.; Branco, M.; Gonzalez-Olabarria, J.R.; Grodzki, W.; Långström, B.; Moreira, F.; Netherer, S.; Orazio, C.; Piou, D.; Santos, H.; Schelhaas, M.J.; Tojic, K.; Vodde, F.; 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Ann. For. Sci.* 66(7), 701–701. <https://doi.org/10.1051/forest/2009054>
- Jaime, L.; Batllori, E.; Ferretti, M.; Lloret, F.; 2022. Climatic and stand drivers of forest resistance to recent bark beetle disturbance in European coniferous forests. *Glob. Ch. Biol.* 28(8), 2830-2841. <https://doi.org/10.1111/gcb.16106>
- Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B.; 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms. *Rem. Sens. Env.* 114(12), 2897-2910. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
- Lecina-Diaz, J.; Martínez-Vilalta, J.; Alvarez, A.; Banqué, M.; Birkmann, J.; Feldmeyer, D.; Vayreda, J.; Retana, J.; 2021. Characterizing forest vulnerability and risk to climate-change hazards. *Front. Ecol. Env.* 19, 126–133. <https://doi.org/10.1002/fee.2278>
- Liang, J.; Crowther, T.W.; Picard, N.; Wisser, S.; Zhou, M.; *et al.*, 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science.* 354(6309). <https://doi.org/10.1126/science.aaf8957>
- Linares, J.C.; Camarero, J.J.; Carreira, J.A.; 2010. Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *J. Ecol.* 98, 592–603. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01645.x>
- Madrigal, J.; Romero-Vivo, M.; Rodríguez Silva, F.; 2019. Definición y recomendaciones técnicas en el diseño de puntos estratégicos de gestión. "Decálogo de Valencia" para la defensa integrada frente a los incendios en la gestión del mosaico agroforestal. Sociedad española de ciencias forestales (SECF), Generalitat Valenciana ISBN: 978-84-941695-4-0
- Manrique-Alba, A.; Beguería, S.; Molina, A.J.; González-Sanchis, M.; Tomàs-Burguera, M.; del Campo, A.D.; Colangelo, M.; Camarero, J.J.; 2020. Long-term thinning effects on tree growth, drought response and water use efficiency at two Aleppo pine plantations in Spain. *Sci. Tot. Env.*, 138536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138536>
- Marino, E.; Ranz, P.; Tomé, J.L.; 2017. Evolución post-incendio de la estructura de la vegetación en el PN de Garajonay a partir de datos LiDAR. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 7º Congreso Forestal Español. Plasencia.
- Martín-Alcón, S.; Coll, L.; De Cáceres, M.; Cabré, M.; Just, A.; González-Olabarria, J.R.; 2015. Combining aerial LiDAR and multi-spectral imagery to assess post-fire regeneration types in a Mediterranean forest. *Can. J. For. Res.* 45(7), 856-866. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0430>

- Martín-Alcón, S.; Coll, L.; Ameztegui, A.; 2016a. Diversifying sub-Mediterranean pinewoods with oak species in a context of assisted migration: responses to local climate and light environment. *App. Veg. Sci.* 19, 254-267. <https://doi.org/10.1111/avsc.12216>
- Martín-Alcón, S.; Coll, L.; 2016b. Unraveling the relative importance of factors driving post-fire regeneration trajectories in non-serotinous *Pinus nigra* forests. *For. Ecol. Manage.* 361, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.006>
- Martín-Alcón, S.; Ameztegui, A.; Coll, L.; 2017. Diversificación o naturalización de las repoblaciones forestales. In: Pemán, J., Iriarte, I., Lario F.J. (eds.), *75 años de una ilusión: la restauración forestal de España*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Madrid, pp. 401-414.
- Messier, C.; Bauhus, J.; Doyon, F.; Maure, F.; Sousa-Silva, R.; Nolet, P.; Mina, M.; Aquilué, N.; Fortin, M.-J.; Puettmann, K.; 2019. The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *For. Ecos.* 6, 21. <http://dx.doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>
- Michel, A.; Prescher, A-K.; Schwärzel, K.; (eds.), 2020. Forest Condition in Europe: The 2020 Assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). Eberswalde: Thünen Institute. <https://doi.org/10.3220/ICPTR1606916913000>
- Molina, A.J.; Navarro Cerrillo, R.M.; Perez Romero, J.; Alejano, R.; Bellot, J.F.; Blanco, J.A.; Camarero, J.J.; Carrara, A.; Castillo, V.M.; Cervera, T.; Barbera, G.G.; Gonzalez Sanchis, M.; Hernandez, A.; Imbert, J.B.; Jimenez, M.N.; Llorens, P.; Lucas Borja, M.E.; Moreno, G.; de las Heras, M.M.; Navarro, F.B.; Palacios, G.; Palero, N.; Ripoll, M.A.; Regues, D.; Ruiz Gomez, F.J.; Vilagrosa, A.; del Campo, A.D.; 2021a. SilvAdapt.Net: A Site-Based Network of Adaptive Forest Management Related to Climate Change in Spain. *Forests*. 12. <http://dx.doi.org/10.3390/f12121807>
- Molina, A.J.; Gonzalez Sanchis, M.; Biel, C.; del Campo, A.D.; 2021b. Ecohydrological turnover in overstocked Aleppo pine plantations: Does the effect of thinning, in relation to water, persist at the mid-term?. *For. Ecol. Manage.* 483: 118781. <http://dx.doi.org/10.3390/f12121807>
- Montero González, G.; Madrigal, G.; Ruíz-Peinado, R.; 2004. Red de parcelas experimentales permanentes del CIFOR-INIA. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 18, 229-236. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i18.9464>
- Morán-Ordóñez, A.; Ameztegui, A.; De Cáceres, M.; 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. *Ecos. Serv.* 45, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101174>
- Moreira, F.; Ascoli, D.; Safford, H.; Adams, M.A.; Moreno, J.M.; Pereira, J.M.C.; Catry, F.X.; Armesto, J.; Bond, W.; González, M.E.; Curt, T.; Koutsias, N.; McCaw, L.; Price, O.; Pausas, J.G.; Rigolot, E.; Stephens, S.; Tavsanoğlu, C.; Vallejo, V.R.; Van Wilgen, B.W.; Xanthopoulos, G.; Fernandes, P.M.; 2020. Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environ. Res. Lett.* 15, 11001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab541e>
- Mueller, J.M.; Hellmann, J.J.; 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Cons. Biol.* 22(3), 562-567. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00952.x>
- 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.

- Muñoz-Gálvez, F.J.; Herrero, A.; Pérez-Corona, M.E.; Andivia, E.; 2022. Resistencia y recuperación del crecimiento a eventos de sequía en rodales mixtos y monoespecíficos de *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pirenaica* Willd. en el centro de la Península Ibérica. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 8º Congreso Forestal Español, Lleida.
- Nocentini, S.; Coll L.; 2013. Mediterranean forests: human use and complex adaptive systems. In: Messier, C.; Puettmann, K.J.; Coates, K.D.; (eds.), *Managing Forests as complex adaptive systems. Building resilience to the challenge of global change*. The Earthscan Forest Library (series). Routledge. NY, USA, pp. 214-243.
- North, M.P.; Stephens, S.L.; Collins B.M.; Agee, J.K.; Aplet, G.; Franklin, J.F.; Fulé P.Z.; 2015. Reform forest fire management. Agency incentives undermine policy effectiveness. *Science*. 394, 1280-1281. <https://doi.org/10.1126/science.aab2356>
- Pardos, M.; del Río, M.; Pretzsch, H.; Jactel, H.; Bielak, K.; Bravo, F.; Brazaitis, G.; Defosse, E.; Engel, M.; Godvod, K.; Jacobs, K.; Jansone, L.; Jansons, A.; Morin, X.; Nothdurft, A.; Oreti, L.; Ponette, Q.; Pach, M.; Riofrío, J.; Ruíz-Peinado, R.; Tomao, A.; Uhl, E.; Calama, R.; 2021. The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe. *For. Ecol. Manage.* 481, 118687. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118687>
- Pausas, J.G.; Bladé, C.; Valdecantos, A.; Seva, J.P.; Fuentes, D.; Alloza, J.A.; Vilagrosa, A.; Bautista, S.; Cortina, J.; Vallejo, R.; 2004. Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes in Spain: New perspectives for an old practice - a review. *Plant Ecol.* 171, 209-220. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029381.63336.20>
- Pérez Romero, J.; González Sanchis, M.; Del Campo García, A.; Bart, R.; Ortiz Miranda, D.; Hurtado, C.; Francés García F.; García-Prats, A.; Escrgi, A.; Moce, P.; Molina Herrera, A.; Blanco Cano, L.; 2022. Cuantificación y optimización de la gestión forestal sostenible y multiobjetivo: LIFE RESILIENT FORESTS. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 8º Congreso Forestal Español, Lleida.
- Piqué, M.; Valor, T.; Larrañaga, A.; Cervera, T.; 2013. Integración de la prevención de incendios en la gestión forestal: tipologías forestales de Cataluña según su vulnerabilidad a generar fuegos de copas. In: Sociedad Española de Ciencias Forestales (ed.), 6º Congreso Forestal Español, Vitoria-Gasteiz.
- Piqué, M.; Domènech, R.; 2018. Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behavior in *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Sci. Tot. Env.* 618, 1539-1546. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.316>
- Pureswaran, D.S.; Roques, A.; Battisti, A.; 2018. Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*. 4, 35–50. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>
- Sabaté, S.; Nadal-Sala, D.; Gracia, C.; 2015. Proyecciones sobre la evolución de los balances de carbono y agua para los bosques españoles en el contexto de cambio climático. In: Herrero, A.; Zavala, M.A.; (eds.). *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- 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. Ind.* 66, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.024>
- Sánchez-Salguero, R.; Navarro-Cerrillo, R.; 2015. La sequía y la gestión histórica como factores del decaimiento forestal en poblaciones de *Pinus sylvestris* y *P. nigra* en el sur peninsular. In: Herrero, A.; Zavala, M.A.; (eds.). *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio*

- Climático: Impactos, vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Santana, M.; Baeza, M.J.; Valdecantos, A.; Vallejo, R.V.; 2018. Redirecting fire-prone Mediterranean ecosystems toward more resilient and less flammable communities. *J. Env. Manage.* 215, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.063>
- Serrada, R.; 2017. La selvicultura en las repoblaciones realizadas según el Plan General de Repoblación Forestal de España en su 75 aniversario. In: Pemán, J.; Iriarte, I.; Lario F.J.; (eds.). *75 años de una ilusión: la restauración forestal de España*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Madrid, pp. 377-400.
- Valor, T.; González Olabarria, J.R.; Piqué, M.; Casals, P.; 2017. The effects of burning season and severity on the mortality over time of *Pinus nigra* spp. *salzmannii* (Dunal) Franco and *P. sylvestris* L. *For. Ecol. Manage.* 406, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.027>
- Vericat, P.; Piqué Nicolau, M.; 2012. Resalveos en monte bajo adulto de roble pubescente. In: Vericat, P.; Piqué, M.; Serrada, R.; (eds.). *Gestión adaptativa al cambio global en masas de Quercus mediterráneas*. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Solsona (Lleida), p. 150-151.
- Viana-Soto, A.; Aguado, I.; Martínez, S.; 2017. Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain). *Environments*. 4, 90. <https://doi.org/10.3390/environments4040090>
- Vila-Cabrera, A.; Martínez-Vilalta, J.; Galiano, L.; Retana, J.; 2013. Patterns of forest decline and regeneration across Scots pine populations. *Ecosystems*. 16, 323-335. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9615-2>
- White, J.C.; Coops N.C.; Wulder, M.A.; Vastaranta, M.; Hilker, T.; Tompalski, P.; 2016. Remote sensing technologies for enhancing Forest inventories: a review. *Can. J. Remote Sens.* 42, 619-641. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>
- Williams, M.I.; Dumroese, R.K.; 2013. Preparing for climate change: forestry and assisted migration. *J. Forestry*. 111, 287-297. <https://doi.org/10.5849/jof.13-016>
- Zhu, Z.; Qiu, S.; He, B.; Deng, C.; 2018. Cloud and cloud shadow detection for Landsat images: the fundamental basis for analyzing Landsat time series. In: Weng, Q. (ed.), *Remote sensing time series image processing*. CRC Press.

