



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

Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO: selvicultura para la adaptación de los pinares mediterráneos al cambio climático

MARTÍN-ALCÓN, S.¹, TOMÉ MORÁN, J.L.¹, JORDÁN GONZÁLEZ, E.², VICENTE VALERO, L.², CHAMÓN FERNÁNDEZ, M.³, COLL MIR, L.⁴, AMEZTEGUI GONZÁLEZ, A.⁴, DEL CAMPO GARCÍA, A.D.⁵, GONZÁLEZ SANCHÍS, M.⁵, MOYA, D.⁶, DE LAS HERAS, J.⁶

¹ Agresta Sociedad Cooperativa.

² Ingeniería del Entorno Natural.

³ Servicio de Gestión y Protección Forestal. D.G. DE MEDIO NATURAL. REGIÓN DE MURCIA.

⁴ Universitat de Lleida

⁵ Universidad Politécnica de Valencia

⁶ Escuela Técnica Superior Ingenieros Agrónomos y Montes, Universidad de Castilla-La Mancha.

Resumen

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (2021-2025), tiene como principal objetivo el desarrollo de nuevas herramientas para la adaptación de los bosques ibéricos de pino carrasco (subtipo 42.841 del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, Anexo I) al cambio climático, así como su aplicación demostrativa. Estas herramientas se centrarán en la detección temprana de los procesos de decaimiento y en la mejora de la resiliencia de este ecosistema mediante el aumento de su vigor, su capacidad de adaptación a la aridificación climática y la capacidad de recuperar sus funciones tras las perturbaciones naturales. El alcance geográfico del proyecto abarca el área potencial de distribución del subtipo en la Península Ibérica, incluyendo las vertientes mediterráneas de las montañas catalanas y del Sistema Ibérico, la cuenca del Ebro y las cordilleras prebéticas. En este trabajo se describen las principales acciones a ejecutar en el proyecto LIFE.

Palabras clave

Pinus halepensis, diversificación, migración asistida, selvicultura ecohidrológica, teledetección.

1. Introducción

El cambio climático está generando impactos importantes en la dinámica y en el funcionamiento futuro de los ecosistemas forestales Mediterráneos. Los escenarios constatan una aceleración en el aumento de las temperaturas y reducciones (entre leves y moderadas) en las precipitaciones, lo que provocará un aumento general de la aridez. Del mismo modo, se espera una mayor frecuencia de eventos extremos (tanto altas temperaturas como bajas precipitaciones), provocando eventos de sequía más frecuentes, intensos y duraderos. El aumento del estrés hídrico asociado con sequías más prolongadas e intensas puede conducir a cambios en la mortalidad y la regeneración de especies vegetales, afectando al rango actual de distribución de especies de plantas y provocando la desaparición y reemplazo de ciertas especies por otras (Cramer et al., 2020). Además, se prevé un aumento progresivo en la frecuencia y severidad de ciertas perturbaciones naturales, como es el caso de los grandes incendios forestales y los episodios de plagas y enfermedades, pudiendo provocar grandes cambios en la distribución y composición de los hábitats forestales a escala regional (Senf y Seidl, 2021).

El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) es la especie del género *Pinus* más ampliamente distribuida en el entorno circunmediterráneo, constituyendo un elemento característico fundamental de los bosques del Mediterráneo occidental. La superficie de estos bosques de pinos en España supera los 2 millones de hectáreas. En la mayor parte de la superficie que ocupan, estos bosques son la única formación arbolada capaz de sobrevivir a las condiciones bioclimáticas presentes. Por ello se

han considerado altamente vulnerables al CC y su desaparición podría conducir a una reducción significativa de la cubierta arbórea en grandes áreas, avanzando hacia la desertificación, especialmente en las zonas de transición entre ombroclimas secos-subhúmedos y semiáridos.

Los impactos del CC son ya una realidad en el contexto de los pinares mediterráneos de pino carrasco en la Península Ibérica. Durante las últimas décadas se ha registrado la ocurrencia de fuertes periodos de sequía (1998-2000, 2005-2006, 2014-2017) que han afectado superficies forestales de cientos a miles de hectáreas, provocando elevadas tasas de mortalidad en el arbolado (De La Serrana et al., 2015). La superficie de pinares de pino carrasco afectada por grandes incendios forestales en el decenio 2006-2015 superó las 70.000 ha, y en el periodo 2016-2019 sumó más de 12.000 nuevas hectáreas (MEyFP, 2021). La ocurrencia de otros fenómenos meteorológicos extremos, como las lluvias torrenciales o las grandes nevadas (danas de enero de 2017, septiembre de 2019, o enero de 2020), sumados a fuertes vientos, han provocado daños severos en miles de hectáreas (Martín Alcón et al., 2019). Y del mismo modo, episodios severos de plagas forestales, en particular escolítidos (especialmente *Tomicus* sp.) y procesionaria (*Thaumetopoea pityocampa*), han ocurrido generalmente tras los episodios más severos de sequía (Guillen-Climent et al., 2020), causando también elevadas tasas de mortalidad en superficies importantes, o importantes pérdidas de vigor en el caso de la procesionaria.

Todos estos hechos constatados hacen que la aplicación de medidas de gestión forestal adaptativa en este hábitat tome el carácter de urgente (Molina et al., 2021). Sin embargo, existen una serie de barreras que actualmente dificultan su puesta en práctica de forma generalizada. Este proyecto pretende contribuir a superar dichas barreras, que son:

1. La ausencia de mapas de idoneidad del hábitat bajo los escenarios de cambio climático y de herramientas de seguimiento de procesos de decaimiento específicas para las masas forestales de *Pinus halepensis* en la totalidad del contexto geográfico estudiado.
2. Ausencia de modelos o directrices de gestión forestal adaptativa para las masas forestales ibéricas de *Pinus halepensis*.

2. Objetivos

El objetivo de la presente comunicación es el de dar a conocer el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO. Este proyecto pretende el desarrollo de nuevas herramientas para la adaptación de los bosques ibéricos de pino carrasco (subtipo 42.841 del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, Anexo I) al cambio climático, así como su aplicación demostrativa. Estas herramientas se centrarán en la detección temprana de los procesos de decaimiento y en la mejora de la resiliencia de este ecosistema mediante el aumento de su vigor, su capacidad de adaptación a la aridificación climática y la capacidad de recuperar sus funciones tras las perturbaciones naturales. El alcance geográfico del proyecto abarcará el área potencial de distribución del subtipo del hábitat en la Península Ibérica, incluyendo las vertientes mediterráneas de las montañas catalanas y del Sistema Ibérico, la cuenca del Ebro y las cordilleras prebéticas. Esto facilitará una implementación integrada, en la que participarán las principales partes interesadas responsables de la reglamentación de la gestión forestal en toda la zona. El logro de este objetivo dependerá del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar un mapa de idoneidad del hábitat e implementar una herramienta para detectar los procesos de decaimiento mediante teledetección.
2. Implementar y monitorear actuaciones de migración asistida dirigidas a mejorar la capacidad del ecosistema para adaptarse a la aridificación climática.
3. Implementar y monitorear tratamientos selvícolas destinados a mejorar la vitalidad y reducir los efectos de la reducción de la disponibilidad de agua.

4. Implementar y monitorear tratamientos selvícolas para mejorar la heterogeneidad estructural y florística y aumentar la diversidad de las respuestas a las perturbaciones.
5. Implementar y monitorear técnicas de gestión adaptativa para mejorar la resiliencia y capacidad adaptativa de la regeneración post-incendio de pino carrasco.
6. Desarrollar herramientas de gestión y transferirlas a la administración forestal, para promover la integración de la adaptación al cambio climático en las regulaciones nacionales y regionales de gestión forestal.
7. Desarrollar tareas de monitoreo para evaluar el éxito e impacto del proyecto.
8. Transferir las técnicas y herramientas implementadas a los principales actores locales y del área de distribución del pino carrasco europeo (baleares, franceses e italianos), con el fin de mejorar la gestión y la conservación a largo plazo del hábitat del pino carrasco en el sur de Europa.

El proyecto será ejecutado durante el periodo 2021-2025 por el consorcio formado por Ingeniería del Entorno Natural, Agresta Sociedad Cooperativa el Servicio de Gestión y Protección Forestal de la D.G. de Medio Natural de la Región de Murcia, la Universitat de Lleida, la Universidad Politécnica de Valencia, y la Universidad de Castilla la Mancha, en el contexto geográfico delimitado por las regiones de Murcia, Castilla-La Mancha, Cataluña, Aragón y la Comunidad Valenciana.

3. Metodología

La gestión para la adaptación al cambio climático comprende una serie de técnicas que pretenden mejorar la capacidad de los bosques para hacer frente a las condiciones futuras. Algunas de estas acciones buscan actuar a escala de árbol individual, mejorando la capacidad de respuesta de los individuos mediante la reducción de la competencia (claras), y otras buscan mejorar la capacidad de respuesta a escala del rodal, incorporando especies y genotipos mejor adaptados (migración asistida) o mediante la diversificación específica y estructural de los rodales para hacerlos más resistentes y resilientes frente a las perturbaciones derivadas del cambio climático (Vilà-Cabrera et al., 2018).

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se basa en la implementación demostrativa de técnicas que permitan la monitorización de los efectos del cambio climático sobre los bosques de *Pinus halepensis* y que fomenten su capacidad de adaptarse a dichos efectos, tanto a escala de árbol individual, como a escala de rodal. En concreto, se pretende implementar diversas técnicas de adaptación de manera integrada, aplicándolas en toda la amplitud del área de distribución del subtipo 42.841 (pinos ibéricos de pino carrasco) del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, lo cual permitirá comprobar su efectividad e idoneidad en un amplio gradiente de condiciones ambientales. Estas técnicas son:

- Cartografía de idoneidad y monitoreo temprano del decaimiento
- Migración asistida en actuaciones de restauración forestal
- Selvicultura de base ecohidrológica
- Fomento de la heterogeneidad específica y estructural
- Fomento de la adaptación de la regeneración tras incendios

La ausencia de mapas de idoneidad del hábitat bajo escenarios de cambio climático y de herramientas de seguimiento de procesos de decaimiento específicas para las masas forestales de *Pinus halepensis* en el contexto geográfico estudiado será abordada a través de procedimientos estadísticos y cartográficos que, partiendo de datos reales de presencia, requerimientos ecológicos, y datos proyectados bajo los diferentes escenarios de cambio climático, hagan posible inferir zonas potencialmente idóneas en función de sus características ambientales. Del mismo modo, a través de la recopilación de datos de seguimiento de decaimiento tomados en inventario de campo por las Administraciones forestales regionales colaboradoras, y el uso de tecnologías de teledetección como

las series temporales de imágenes de Landsat (sensores TM, ETM+ y OLI), se generarán modelos predictivos de ocurrencia y severidad de procesos de decaimiento a escala regional. Estos modelos se aplicarán de forma continua a las nuevas series de imágenes disponibles, ampliando al programa Copernicus de la Comisión Europea, generando una herramienta periódicamente actualizable para el diagnóstico de los procesos de decaimiento en masas forestales de *Pinus halepensis*.

Por otra parte, la ausencia de modelos o directrices de gestión forestal adaptativa para las masas forestales ibéricas de *Pinus halepensis*, será abordada a través de la implementación demostrativa de actuaciones de Gestión Forestal Adaptativa, la monitorización de estas actuaciones, y de otras actuaciones de Gestión Forestal Adaptativa implementadas en proyectos anteriores con carácter experimental, piloto o demostrativo, desarrollados durante la última década. Finalmente, a través de la transferencia de los conocimientos científico-técnicos adquiridos a través de directrices de gestión, fomentando su transferibilidad y la replicabilidad de las medidas de gestión propuestas.

Las técnicas propuestas están respaldadas por las evidencias científicas más recientes, si bien no han sido aplicadas de forma extensiva más allá de estudios científicos o pequeñas pruebas piloto.

4. Resultados

Los resultados esperados del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO son los siguientes:

1. Evaluación de la vulnerabilidad del hábitat a través del desarrollo de mapas de idoneidad y del diagnóstico de procesos de decaimiento forestal. Estos productos cartográficos serán implementados en un visor cartográfico con posibilidad de descarga de mapas, permitiendo a los gestores forestales disponer de esta información para diseñar estrategias de adaptación y planificar acciones de gestión forestal adaptativa en las zonas afectadas.
2. Guías técnicas (GT) de gestión forestal adaptativa de los bosques de pino carrasco frente al cambio climático. La transferencia de soluciones de adaptación innovadoras a los gestores forestales en toda el área de distribución del pino carrasco supondrá un cambio de paradigma hacia la gestión forestal adaptativa de estos hábitats:
 - a. GT para la restauración forestal del hábitat del pino carrasco incorporando criterios de migración asistida.
 - b. GT de silvicultura ecohidrológica adaptada a la variedad de sitios y condiciones bioclimáticas del pino carrasco en la Península Ibérica.
 - c. GT para la diversificación estructural y florística de los bosques ibéricos de pino carrasco.
 - d. GT para la gestión adaptativa de la regeneración post-incendio.
3. Implementación de 42 parcelas demostrativas (108 ha) y monitoreo de las mismas y de al menos otras 20 actuaciones previamente implementadas en bosques distribuidos en 3 regiones bioclimáticas (Figura 1). Dependiendo de las características específicas de cada acción C (acciones de implementación), se alcanzarán diferentes objetivos cuantitativos en relación con: la mejora de la vitalidad y estabilidad de los árboles, la reducción de la vulnerabilidad a los incendios forestales, el éxito de la regeneración natural y/o artificial, el aumento de la diversidad florística y estructural y el equilibrio hidrológico entre entradas y uso de agua del ecosistema.

Región	Murcia-Alicante-Albacete	Valencia-Castellón-Tarragona	Teruel-Zaragoza-Lleida	TOTAL
Bioclima	<i>Mediterráneo árido y subárido</i>	<i>Mediterráneo costero</i>	<i>Mediterráneo continentalizado</i>	
C2 – Migración asistida en restauración forestal	6 rodales (6 x 2 ha)	3 rodales (3 x 2 ha)	3 rodales (3 x 2 ha)	12 rodales (24 ha)
C3 – silvicultura ecohidrológica	3 rodales (3 x 2 ha)	3 rodales (3 x 2 ha)	3 rodales (3 x 2 ha)	9 rodales (18 ha)
C4 – diversificación estructural y florística	6 rodales (6 x 4 ha)	3 rodales (3 x 4 ha)	3 rodales (3 x 4 ha)	12 rodales (48 ha)
C5 – gestión regenerado posincendio	3 rodales (3 x 2 ha)	3 rodales (3 x 2 ha)	3 rodales (3 x 2 ha)	9 rodales (18 ha)

Figura 1. Esquema de las actuaciones demostrativas propuestas en el proyecto.

- Transferencia y promoción del uso de estas herramientas y técnicas de gestión adaptativa (replicabilidad) para facilitar su uso por parte de los propietarios y gestores forestales a escala local, regional y del sur de Europa.
- Incremento del nivel de conocimiento y sensibilización de los actores implicados y del público en general sobre el problema tratado y las soluciones aportadas por el proyecto. Se asegurará la participación de los grupos de interés, involucrándose en las decisiones de gestión.

5. Discusión

En un contexto de cambio rápido, el monitoreo de los bosques a través de inventarios de campo con baja periodicidad (e. g. IFN) no permite cubrir las necesidades de la gestión para la adaptación. Otras iniciativas, como la Red Europea de Daños en los Bosques (Nivel I), con mayor resolución temporal, carecen del nivel de detalle espacial necesario. La teledetección supone una fuente de datos excepcional por su continuidad, su alta resolución espacial y su alta periodicidad, que ha propiciado el desarrollo de numerosas aplicaciones, entre las que se incluye la evaluación del estado sanitario de los bosques tras afecciones por plagas o patógenos. La detección del decaimiento por sequía es más reciente, y se fundamenta en la detección del descenso en la actividad fotosintética y el contenido de clorofila (Gómez et al., 2019). Existen para ello diversos índices como el SIF, NDVI, MSI o GNDVI que han probado ser útiles (Hernández-Clemente et al., 2017; Zarco-Tejada et al., 2018). Hasta la fecha, estos trabajos se circunscriben a zonas concretas y, en general, no han trascendido el ámbito puramente académico. El proyecto propone, por primera vez, aplicar estas metodologías en todo el ámbito de distribución de *Pinus halepensis* en España, incorporando esta metodología a una plataforma que ofrezca un servicio de visualización y actualización periódica del estado sanitario de los bosques de pino carrasco.

Por su parte, la migración asistida consiste en el cambio de la composición específica o genética de una población, buscando sustituir (o complementar) a las especies o poblaciones mal adaptadas por especies o genotipos mejor adaptados a las condiciones climáticas previstas en el futuro. El concepto de migración asistida incluye el traslado de (1) poblaciones bien adaptadas de una especie a zonas dentro de su área de distribución donde se observan problemas de adaptación, (2) una especie a una zona fuera de su área de distribución actual, y (3) una especie mucho más allá de su rango actual, a áreas cuyo clima futuro se espera que sea adecuado para su desarrollo (Ste-Marie et al., 2011). Estas técnicas han sido muy estudiadas en Norteamérica, donde incluso comienzan a aplicarse (sobre todo las acepciones 1 y 2) con el objetivo de mantener la productividad de los bosques (Handler et al., 2018). Sin embargo, en Europa, y en concreto en el ámbito mediterráneo, la

migración asistida es un fenómeno mucho menos estudiado, y hasta el momento no se ha aplicado más allá de algunos experimentos científicos a pequeña escala (e. g. Martín-Alcón et al., 2016). Este proyecto propone aplicar la migración asistida en su primera acepción, utilizando las regiones de procedencia del pino carrasco y otras especies arbóreas acompañantes como fuente de diversidad genotípica, y testando su adaptación a lo largo del área de distribución actual del pino carrasco en la Península Ibérica.

Numerosas masas de pino carrasco presentan actualmente densidades elevadas y un crecimiento lento, como consecuencia de la expansión del bosque tras el declive en las actividades agropecuarias y la falta de gestión forestal. Estas masas son particularmente vulnerables a la sequía, y en un escenario de mayor aridez se prevén dificultades importantes para su persistencia. La silvicultura de base ecohidrológica pretende reducir la densidad de las masas optimizando la disponibilidad hídrica de los árboles y mejorando por tanto su vigor, haciéndolos menos vulnerables a las condiciones futuras. Dicha técnica se está testando actualmente mediante experimentos que evalúan la distribución óptima de las precipitaciones para fomentar el vigor de los árboles en función de distintos tratamientos selvícolas (del Campo et al., 2019, 2018). Otros experimentos han tratado de afrontar este problema mediante modelización, permitiendo testar mayor número de tratamientos e incorporar las condiciones climáticas futuras (Ameztegui et al., 2017; De Cáceres et al., 2021, 2015). Este proyecto pretende combinar ambas aproximaciones para demostrar la efectividad de diversos modelos selvícolas para priorizar el objetivo ecohidrológico tanto en las condiciones actuales como las previstas bajo diversos escenarios de cambio.

Una parte importante de los mecanismos que confieren capacidad de adaptación a las masas forestales frente al cambio ambiental se relacionan con su heterogeneidad composicional y estructural. Por ello, durante los últimos años se viene apuntando la necesidad de promover bosques heterogéneos a distintas escalas (genético, específico, estructural) para fomentar la emergencia de respuestas adaptativas frente al cambio (Messier et al., 2019, 2013). En la literatura científica se ha comprobado que la diversidad de especies se relaciona con una mayor productividad (Vilà et al., 2013), una mayor estabilidad del crecimiento frente a fluctuaciones climáticas y períodos de sequía (Morin et al., 2014), una mayor capacidad de resistencia frente a ataques de orden biótico (plagas, patógenos; Guyot et al. (2016)) y una mayor capacidad de recuperación de los bosques tras una perturbación (Martín-Alcón y Coll, 2016; Sánchez-Pinillos et al., 2016). Existe un buen conocimiento sobre cómo promover la diversificación de los bosques desde el manejo de la espesura y los tratamientos de regeneración (Martín-Alcón et al. 2017) si bien tenemos aún pocos ejemplos prácticos de aplicación de una silvicultura dirigida a tal fin. Este proyecto pretende dar respuesta a esta necesidad y plantea la ejecución de un conjunto de actuaciones selvícolas innovadoras y demostrativas en bosques puros de pino carrasco, consistentes en tratamientos de dosificación de competencia y/o en la creación de aperturas moderadas del dosel, para propiciar la creación de espacios aptos para el establecimiento y desarrollo de un mayor número de especies forestales y la progresiva diversificación estructural de los rodales. En las actuaciones planteadas se respetarán los elementos singulares del bosque y se promoverá la progresiva diversificación del sotobosque.

En relación a la gestión forestal adaptativa de los pinares regenerados tras incendio, los objetivos tradicionales de restauración post-incendio se han centrado en el corto y medio plazo, básicamente en las medidas urgentes de protección de suelos y aguas. En los bosques mediterráneos, las principales prioridades de restauración deberían ampliarse a la mejora de la resiliencia de la vegetación, la mejora de la biodiversidad y la reintroducción de especies clave que podrían haber desaparecido (de las Heras et al., 2012; Vallejo et al., 2012). Este enfoque sólo puede llevarse a cabo con un profundo conocimiento científico de las respuestas de los ecosistemas al fuego (Vega et al., 2018). Este proyecto pretende la ejecución de un conjunto de actuaciones selvícolas innovadoras y demostrativas en bosques de pino carrasco afectados por grandes incendios

forestales, para mejorar la resiliencia de la regeneración frente a nuevas perturbaciones, así como su capacidad adaptativa frente a un escenario de aridificación climática.

6. Conclusiones

En resumen, el proyecto LIFE adapt-aleppo, que será ejecutado durante el periodo 2021-2025, tiene un inminente y justificado carácter demostrativo, siendo los principales aspectos a demostrar los siguientes:

1. El mapeo de la idoneidad del hábitat junto a la monitorización de los procesos de decaimiento permite anticipar, planificar y emprender acciones para mejorar su capacidad de adaptación a las nuevas condiciones, antes de que los cambios sean irreversibles.
2. La migración asistida mejora el éxito y la capacidad adaptativa de las actuaciones de restauración forestal de pinares degradados.
3. La silvicultura de base ecohidrológica mejora el vigor de los pinares de pino carrasco ante eventos severos de sequía.
4. Las técnicas y modelos selvícolas dirigidos a incrementar la diversidad o heterogeneidad florística y estructural del hábitat mejoran la resiliencia de los pinares de pino carrasco.
5. La gestión adaptativa de la regeneración post-incendio de pino carrasco da lugar a formaciones más diversas, resilientes, y adaptables.
6. La participación de los principales actores implicados en la gestión forestal en la modificación de las prácticas de gestión, orientándose a la lucha contra el cambio climático, garantiza la persistencia a largo plazo de sus usos y funciones.

7. Agradecimientos

El Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (*Adaptive management of Mediterranean Pinus halepensis forests in the face of climate change*) con código LIFE20 CCA/ES/001809 ha recibido financiación del programa LIFE de la Unión Europea. Además, recibe el apoyo de las siguientes administraciones forestales regionales: Generalitat Valenciana, Gobierno de Aragón, Generalitat de Catalunya, Junta de Castilla la Mancha.

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. Modell.* 356, 141–150.

CRAMER, W., GUIOT, J., MARINI, K., SECRETARIAT, M., BLEU, P.; 2020. Climate and environmental change in the Mediterranean basin–current situation and risks for the future. First Mediterr. Assess. Report. MedECC (Mediterranean Expert. Clim. Environ. Chang. Union Mediterr. Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, Fr.

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. *Agríc. For. Meteorol.* 213, 77–90.

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

approach. *Agric. For. Meteorol.* 296, 108233.

DE LA SERRANA, R.G., VILAGROSA, A., ALLOZA, J.A.; 2015. Pine mortality in southeast Spain after an extreme dry and warm year: interactions among drought stress, carbohydrates and bark beetle attack. *Trees* 29, 1791–1804.

DE LAS HERAS, J., MOYA, D., VEGA, J.A., DASKALAKOU, E., VALLEJO, V.R., GRIGORIADIS, N., TSITSONI, T., BAEZA, J., VALDECANTOS, A., FERNÁNDEZ, C.; 2012. Post-fire management of serotinous pine forests. En: MOREIRA, F., ARIANOUTSOU, M., CORONA, P., & DE LAS HERAS, J. (Eds.). *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*. Springer, pp. 121–150.

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. *Agric. For. Meteorol.* 264, 266–282.

DEL CAMPO, A.D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., LIDÓN, A., CEACERO, C.J., GARCÍA-PRATS, A.; 2018. Rainfall partitioning after thinning in two low-biomass semiarid forests: Impact of meteorological variables and forest structure on the effectiveness of water-oriented treatments. *J. Hydrol.* 565, 74–86.

GOMEZ, C., ALEJANDRO, P., HERMOSILLA, T., MONTES, F., PASCUAL, C., RUIZ FERNÁNDEZ, L.Á., ALVAREZ-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, 1–33.

GUILLEN-CLIMENT, M.L., MAS, H., FERNÁNDEZ-LANDA, A., ALGEET-ABARQUERO, N., TOMÉ, J.L.; 2020. Uso de imágenes hiperespectrales para la predicción del marchitamiento de *Pinus halepensis* (Mill.) en el bosque mediterráneo. *Rev. Teledetección* 55, 59–69.

GUYOT, V., CASTAGNEYROL, B., VIALATTE, A., DECONCHAT, M., JACTEL, H.; 2016. Tree diversity reduces pest damage in mature forests across Europe. *Biol. Lett.* 12, 0–4.

HANDLER, S., PIKE, C., ST CLAIR, B., ABBOTTS, H., JANOWIAK, M.; 2018. Assisted migration. USDA Forest Service Climate Change Resource Center.

HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., NORTH, P.R.J., HORNERO, A., ZARCO-TEJADA, P.J.; 2017. Assessing the effects of forest health on sun-induced chlorophyll fluorescence using the FluorFLIGHT 3-D radiative transfer model to account for forest structure. *Remote Sens. Environ.* 193, 165–179.

MARTÍN-ALCÓN, S., COLL, L.; 2016. Unraveling the relative importance of factors driving post-fire regeneration trajectories in non-serotinous *Pinus nigra* forests. *For. Ecol. Manage.* 361.

MARTÍN-ALCÓN, S., COLL, L., AMEZTEGUI, A.; 2016. Diversifying sub-Mediterranean pinewoods with oak species in a context of assisted migration: Responses to local climate and light environment. *Appl. Veg. Sci.* 19.

MARTÍN ALCÓN, S., GIL-TENA, A., YAÑEZ-RAUSELL, L., CANTÓN MEGÍA, J.; 2019. Cuantificación de la biomasa forestal muerta como consecuencia de perturbaciones a partir del análisis de imágenes Sentinel-2 y LiDAR. En: DÍAZ, V., OLIVER-VILLANUEVA, J.V. (Eds.), III Congreso Forestal de La C.V.: Gestión de Incendios Forestales En El Contexto Del Cambio Climático. pp. 153–166.

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. Ecosyst.* 6, 1–16.

MESSIER, C., PUETTMANN, K.J., COATES, K.D. (Eds.); 2013. Managing forests as complex adaptive systems: building resilience to the challenge of global change. Routledge, New York, USA, USA.

MEyFP, 2021. Estadísticas de Incendios Forestales [WWW Document]. URL: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/Incendios_default.aspx (último acceso 17.01.2022).

MOLINA, A.J., NAVARRO-CERRILLO, R.M., PÉREZ-ROMERO, J., ALEJANO, R., BELLOT, J.F., BLANCO, J.A., CAMARERO, J.J., CARRARA, A., CASTILLO, V.M., CERVERA, T.; 2021. SilvAdapt. Net: A Site-Based Network of Adaptive Forest Management Related to Climate Change in Spain. *Forests* 12, 1807.

MORIN, X., FAHSE, L., DE MAZANCOURT, C., SCHERER-LORENZEN, M., BUGMANN, H.; 2014. Temporal stability in forest productivity increases with tree diversity due to asynchrony in species dynamics. *Ecol. Lett.* 17, 1526–1535.

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.

SENF, C., SEIDL, R.; 2021. Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nat. Sustain.* 4, 63–70.

STE-MARIE, C., NELSON, E.A., DABROS, A., BONNEAU, M.-E., 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *For. Chron.* 87, 724–730.

VALLEJO, V.R., ARIANOUTSOU, M., MOREIRA, F., 2012. Fire Ecology and Post-Fire Restoration Approaches in Southern European Forest Types, En: Moreira, F., Arianoutsou, M., Corona, P., De las Heras, J. (Eds.), Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests. Springer Netherlands, pp. 93–119.

VEGA, G.-D., DE LAS HERAS, J., MOYA, D.; 2018. Post-fire regeneration and diversity response to burn severity in *Pinus halepensis* Mill. forests. *Forests* 9, 299.

VILÀ, M., CARRILLO-GAVILÁN, A., VAYREDA, J., BUGMANN, H., FRIDMAN, J., GRODZKI, W., HAASE, J., KUNSTLER, G., SCHELHAAS, M.M.-J.J., TRASOBARES, A.; 2013. Disentangling biodiversity and climatic determinants of wood production. *PLoS One* 8, e53530–e53530.

VILÀ-CABRERA, A., COLL, L., MARTÍNEZ-VILALTA, J., RETANA, J.; 2018. Forest management for adaptation to climate change in the Mediterranean basin: A synthesis of evidence. *For. Ecol. Manage.* 407, 16–22.

ZARCO-TEJADA, P.J., HORNERO, A., HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., BECK, P.S.A.; 2018. Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery. *J. Photogramm. Remote Sens.* 137, 134–148.