



LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/001809)



IMPLEMENTACIÓN DE LA SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA EN LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO está financiado por el Programa LIFE de la Unión Europea bajo el Acuerdo de Subvención LIFE20 CCA/ES/001809.



El contenido incluido en esta guía refleja únicamente la opinión del autor y la Agencia/Comisión Europea no es responsable del uso que pueda hacerse de la información que contiene.

Esta guía forma parte del material de divulgación, transferencia y replicabilidad en el marco de las acciones C6 y E4 del Proyecto LIFE20 CCA/ES/001891- LIFE ADAPT-ALEPPO “Gestión adaptativa de los bosques mediterráneos de *Pinus halepensis* ante el cambio climático”

EDICIÓN:

Dirección General de Patrimonio Natural y Acción Climática de la Comunidad Autónoma Región de Murcia. Ingeniería del Entorno Natural.

REDACCIÓN:

Laura Blanco Cano (1), Antonio Del Campo García (1), Santiago Martín Alcón (2), Jorge Olivar Ruiz (2), Aitor Ameztegui (3)

(1) Universitat Politècnica de Valencia

(2) Agresta Sociedad Cooperativa.

(3) Grupo de Investigación en Dinámica Forestal y Gestión Adaptativa (ADAPTAFOR). Universitat de Lleida

FOTOGRAFÍAS:

Las imágenes adjuntas a este manual han sido tomadas por los autores de la guía.

DISEÑO Y MAQUETACIÓN:

Jose Juan Rivas Nieto

CITA BIBLIOGRÁFICA:

Blanco, L.; del Campo, A.; et al. 2025. Guía técnica

“Implementación de la silvicultura ecohidrológica en los pinares ibéricos de pino carrasco”

DEPÓSITO LEGAL: MU 341-2025

FINANCIADO:

Programa LIFE de la Unión Europea

Esta publicación será reproducible por todos los medios, citando las fuentes y con finalidad no lucrativa.

La información incluida en el presente documento refleja solo la opinión de sus autores, excluyendo a la Agencia/Comisión Europea de cualquier uso que pueda derivarse de ella.

GUÍA TÉCNICA

IMPLEMENTACIÓN DE LA SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA EN LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

1

INTRODUCCIÓN

2

1.1.	ANTECEDENTES	2
1.2.	OBJETIVOS	4
1.3.	GLOSARIO Y CONCEPTOS CLAVE	5

2

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT 42.841 - PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

7

2.1.	ECOLOGÍA DEL HÁBITAT	7
2.2.	DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT	8

3

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

4

LA GESTIÓN FORESTAL COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN DE LOS BOSQUES AL CAMBIO CLIMÁTICO

11

5

IMPLEMENTACIÓN DE LA SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA EN LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

13

5.1.	BASES CIENTÍFICO-TÉCNICAS	13
5.2.	SISTEMAS FORESTALES OBJETO DE APLICACIÓN Y RECOMENDACIONES GENERALES	13
5.3.	DESCRIPCIÓN DE MEDIDAS IMPLEMENTADAS EN EL PROYECTO	14
	5.3.1. Diseño de las actuaciones	14
	5.3.2. Protocolo de seguimiento	16
	5.3.3. Resultados	18

6

ANÁLISIS ECONÓMICO

19

7

RECOMENDACIONES TÉCNICAS

19

8

BIBLIOGRAFÍA

19

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El cambio climático está ejerciendo impactos notables en la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas forestales Mediterráneos, impactos que pueden verse acentuados en un futuro próximo. Los escenarios constatan una aceleración en el aumento de las temperaturas, 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 y severos. 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. 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.

El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) es la especie del género *Pinus* más ampliamente distribuida en el entorno circunmediterráneo. Es 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 arbórea capaz de sobrevivir a las condiciones bioclimáticas presentes, por ello se han considerado altamente vulnerables al cambio climático. 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. Todos estos hechos constatados hacen que la práctica de medidas de gestión forestal adaptativa en este hábitat tome el carácter de urgente. Sin embargo, existen una serie de carencias de conocimiento científico-técnico que dificultan su puesta en práctica de forma generalizada. El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/001809), ejecutado en el periodo 2021-2025, ha pretendido contribuir a superar estas carencias, principalmente en dos líneas de acción:

1. La ausencia diagnósticos de idoneidad del hábitat bajo los escenarios de cambio climático, así como de herramientas de seguimiento de procesos de decaimiento específicas para las masas forestales de *Pinus halepensis*.
2. La ausencia de modelos o directrices de gestión forestal adaptativa para las masas forestales ibéricas de *Pinus halepensis*.

Las Guías Técnicas para la Adaptación al Cambio Climático en pinares de *Pinus halepensis* en el Mediterráneo constituyen el principal resultado del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO a nivel de transferencia de resultados, pretendiendo sintetizar y transferir las aportaciones del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO en estas líneas de conocimiento. Se espera que a través de estas Guías pueda transformarse el carácter demostrativo de las actuaciones ejecutadas en el proyecto LIFE en aplicaciones reales replicadas a gran escala para mejorar la capacidad de adaptación, y por tanto la resiliencia de las masas forestales en el área mediterránea de la Península Ibérica. También, que los avances del proyecto, sintetizados en las Guías Técnicas, puedan ser integrados en las herramientas de planificación forestal y puedan ser así aplicadas en los procesos de toma de decisiones en materia de gestión forestal sostenible.



Así pues, el conjunto de Guías Técnicas elaboradas abarca:

- Las metodologías para el mapeo de la idoneidad del hábitat y el seguimiento de los procesos de decaimiento en pinares de *Pinus halepensis*.
- El uso de la migración asistida de *Pinus halepensis* en trabajos de restauración forestal de su hábitat.
- El uso de la selvicultura de base ecohidrológica en pinares de *Pinus halepensis*.
- El uso de medidas selvícolas para el fomento de la resiliencia y adaptabilidad de las masas a través de la diversificación estructural y florística en pinares de *Pinus halepensis*.
- El uso de medidas selvícolas para la gestión adaptativa de la regeneración post-incendio en pinares de *Pinus halepensis*.

El equipo técnico-científico que ha participado en la ejecución del proyecto LIFE y, en particular, en la redacción de las Guías Técnicas, es el conformado por:

- IDEN (Ingeniería del Entorno Natural), empresa con base en Castilla La-Mancha y la Región de Murcia, con amplia experiencia en consultoría de Ingeniería y Medio Ambiente.
- Agresta Sociedad Cooperativa, empresa de ámbito nacional, especializada en consultoría e innovación en torno a la gestión forestal y del medio natural.
- La Universitat de Lleida a través del Grupo de Investigación en Gestión Adaptativa y Dinámica Forestal (ADAPTAFOR).
- La Universidad Politécnica de Valencia a través del grupo de hidrología forestal Re-ForeST
- La Universidad de Castilla-La-Mancha a través del grupo de investigación de Ecología Forestal (ECOFOR) del Instituto botánico y ETSIAMB de Albacete.
- La Consejería de Medio Ambiente, Universidades, Investigación y Mar Menor (CARM) de la Región de Murcia.

1.2. OBJETIVOS

El principal objetivo del proyecto LIFE adapt-aleppo ha sido 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.

El logro del objetivo general del proyecto requería del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- 01** – Desarrollar un mapa de idoneidad del hábitat e implementar una herramienta para detectar los procesos de decaimiento mediante teledetección.
- 02** – Implementar y monitorear actuaciones de migración asistida dirigidas a mejorar la capacidad del ecosistema para adaptarse a la aridificación climática.
- 03** – Implementar y monitorear tratamientos selvícolas destinados a mejorar la vitalidad y reducir los efectos de la reducción de la disponibilidad de agua.
- 04** – Implementar y monitorear tratamientos selvícolas para mejorar la heterogeneidad estructural y florística y aumentar la diversidad de las respuestas a las perturbaciones.
- 05** – Implementar y monitorear técnicas de gestión adaptativa para mejorar la resiliencia y capacidad adaptativa de la regeneración post-incendio de pino carrasco.
- 06** – 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.
- 07** – Desarrollar tareas de monitoreo para evaluar el éxito e impacto del proyecto.
- 08** – 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 objetivo de esta Guía Técnica es recoger de forma sintética e integrada el modelo de gestión adaptativa de masas de *Pinus halepensis* mediante técnicas selvícolas innovadoras de base ecohidrológica, y más concretamente:

- Tipificar los sistemas forestales objetivo para la implementación de la selvicultura ecohidrológicas
- Describir las funciones hidrológicas a optimizar a través de la gestión forestal
- Caracterizar la influencia de los cuatro tratamientos desarrollados en el proyecto sobre las funciones ecohidrológicas

1.3. GLOSARIO Y CONCEPTOS CLAVE

ADAPTACIÓN

Ajustes en sistemas naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales.

AGUA AZUL

Es el agua que se exporta o sale del ecosistema bosque por escorrentía o drenaje profundo, llegando a los cursos de agua y/o acuíferos donde queda disponible para su consumo.

AGUA VERDE

parte de la precipitación que es absorbida por la vegetación y que acabará volviendo a la atmósfera a través de la transpiración.

ARIDEZ

Estado que resulta de la deficiencia en agua, como consecuencia de la escasez de precipitaciones y de la intensidad de la evaporación por las elevadas temperaturas. Es la insuficiencia de agua en el suelo y en la atmósfera. Las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) define la aridez mediante la interrelación de la temperatura con las precipitaciones, basándose en el supuesto que con la temperatura aumenta correlativamente la evapotranspiración.

BANDA ESPECTRAL

Franja del espectro en la que opera el sensor del satélite para captar los niveles de energía emitidos por los objetos y ser traducida digitalmente en cada uno de los archivos que forman una imagen para representar visualmente la información.

DECAIMIENTO

Proceso por el que una comunidad de árboles, matorral u otras formaciones vegetales pierden vigor debido, principalmente, a la competencia intra y/o interespecífica o por la acción directa o difusa de agentes bióticos o abióticos nocivos.

ESTRÉS HÍDRICO

Concepto que designa la falta de agua en la vegetación, la cual se traduce en un descenso de actividad clorofílica de la planta y mayor nivel de riesgo de ataques por plagas, enfermedades o incendios.

IDONEIDAD DEL HÁBITAT

Concepto que designa el nicho fundamental de un hábitat, el cual está definido por una función $f(x, y)$ donde x e y son las variables ambientales que definen las condiciones donde el hábitat puede darse.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN

Un índice de vegetación es un valor único que se calcula transformando las observaciones de múltiples bandas espectrales. Se utiliza para realzar la presencia de elementos de vegetación verde y así ayudar a distinguirlos de los otros objetos presentes en la imagen. Dependiendo del método de transformación y de las bandas espectrales utilizadas, se podrían evaluar diferentes aspectos de la cobertura vegetal de la imagen, como el porcentaje de cobertura vegetal, la cantidad de clorofila, el índice de área foliar, etc.

LANDSAT

Misión espacial que recibe su nombre de la abreviatura LAND (tierra) y SAT (satélite) cuya constelación de satélites está gestionada por la NASA con el fin de monitorizar y llevar a cabo un seguimiento de la Tierra. Entre los productos más convencionales ofrecidos por los satélites de la misión se encuentran sus imágenes de libre descarga.

MIGRACIÓN ASISTIDA

Cambio de la composición específica o genética de una población, buscando sustituir (o complementar) a las especies o poblaciones locales por especies o genotipos mejor adaptados a las condiciones climáticas previstas en el futuro.

MODELO CLIMÁTICO

Representación de los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan el sistema climático. Se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático para las proyecciones del clima futuro.

NBR

Acrónimo del índice normalizado de incendios (Normalized Burn Ratio) destinado a identificar las zonas territoriales afectadas por un incendio y analizar la severidad generada por el mismo a través de las bandas de trabajo como el NIR y el SWIR.

REGIONES BIOCLIMÁTICAS

Zonas que presentan un clima predominante, con una vegetación y fauna adaptada a ella y con ecosistemas propios de dicha zona.

RESILIENCIA

Capacidad de un sistema ecológico para recuperar sus propiedades después de verse alterado por una perturbación o un estrés intenso y continuado.

SELVICULTURA ADAPTATIVA O SELVICULTURA PARA LA ADAPTACIÓN

La silvicultura para la adaptación frente al cambio climático se fundamenta en plantear aquellas prácticas que permitan reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad adaptativa de las especies forestales frente al factor de estrés más limitante, que en el caso mediterráneo es el déficit hídrico.

SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA

Silvicultura que sitúa al agua en el centro de la planificación y cuantifica otras variables del ecosistema, como el crecimiento y vigor de los árboles/masa, las propiedades del suelo y los ciclos biogeoquímicos, la sensibilidad al clima de los árboles o la disminución del riesgo de incendios forestales.

SENTINEL

Flota de satélites de la Agencia Espacial Europea, que forman una constelación bajo diferentes misiones y cuyos satélites proveen de imágenes ópticas y datos radar que pueden ser descargadas gratuitamente y a máxima resolución.

SERIES TEMPORALES

Una serie temporal de imágenes de satélite está compuesta por una secuencia de imágenes (puntos de datos) de una misma ubicación, tomadas en intervalos regulares durante un periodo de tiempo determinado.

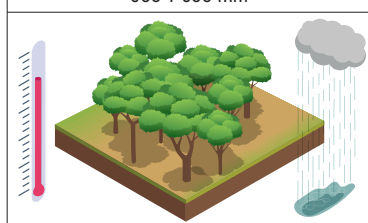
TRAYECTORIAS SOCIOECONÓMICAS COMPARTIDAS (SSP)

Son escenarios de cambios socioeconómicos globales proyectados hasta 2100. Se utilizan para derivar escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero según diferentes políticas climáticas, basados en narrativas que describen desarrollos socioeconómicos alternativos. Los escenarios son:

- SSP1: Sostenibilidad
- SSP2: Mitad del camino
- SSP3: Rivalidad regional
- SSP4: Desigualdad
- SSP5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles

2. ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT 42.841 – PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

2.1. ECOLOGÍA DEL HÁBITAT

TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES ENTRE 12 Y 18 °C
PRECIPITACIONES ANUALES ENTRE 300 Y 600 mm


CLIMA MEDITERRÁNEO

Temperaturas

El hábitat se encuentra en regiones de clima mediterráneo, caracterizado por inviernos suaves y lluviosos y veranos cálidos y secos. Las temperaturas medias anuales suelen oscilar entre los 12 y 18 °C.

Precipitación

El pino carrasco es muy resistente a la sequía, prosperando en áreas con precipitaciones anuales bajas, que pueden variar entre 300 y 600 mm. En algunos casos, puede sobrevivir en zonas con precipitaciones aún más bajas, gracias a su adaptabilidad.

NO ES EXIGENTE CON EL TIPO DE SUELO
SOporta SUELOS CON PH VARIADO, AUNQUE MUESTRA PREFERENCIA POR LOS LIGERAMENTE ALCALINOS


REQUERIMIENTOS EDÁFICOS

Tipos de suelo

El pino carrasco no es exigente en cuanto al tipo de suelo, colonizando suelos calizos, margosos, arenosos y arcillosos. Su capacidad para crecer en suelos pedregosos y pobres en nutrientes le permite establecerse en áreas marginales donde otras especies de árboles no prosperarían.

Adaptabilidad

Es capaz de soportar suelos con pH variado, aunque muestra preferencia por suelos ligeramente alcalinos. Su adaptabilidad a diferentes tipos de suelo le permite colonizar terrenos degradados y erosionados, contribuyendo a su recuperación.

SOTOBOSQUE: ESPECIES TÍPICAS DE LA GARRIGA Y EL MATORRAL MEDITERRÁNEO
HERBÁCEAS Y GRAMÍNEAS, MUCHAS DE ELLAS ADAPTADAS A CONDICIONES DE SEQUÍA ESTACIONAL Y SUELOS POBRES


VEGETACIÓN ASOCIADA

Estrato arbustivo

En el sotobosque se encuentran especies típicas de la garriga y el matorral mediterráneo, como el lentisco (*Pistacia lentiscus*), el enebro (*Juniperus oxycedrus*), el romero (*Rosmarinus officinalis*), la coscoja (*Quercus coccifera*), aladierno (*Rhamnus alaternus*), espinos (*Rhamnus lycioides*), etc.

Estrato herbáceo

Incluye una variedad de especies herbáceas y gramíneas, muchas de las cuales están adaptadas a condiciones de sequía estacional y suelos pobres. Algunas de estas especies pueden ser aromáticas o medicinales, contribuyendo a la biodiversidad del ecosistema.

ALBERGAN GRAN DIVERSIDAD DE ESPECIES DE MAMÍFEROS Y AVES
BIODIVERSIDAD DE INVERTEBRADOS ALTA


FAUNA ASOCIADA

Mamíferos

Los pinares de pino carrasco albergan una diversidad de mamíferos, como el jabalí (*Sus scrofa*), el zorro (*Vulpes vulpes*), y pequeños roedores como el lirón careto (*Eliomys quercinus*).

Aves

Hábitat crucial para muchas especies de aves, tanto residentes como migratorias. Entre ellas se encuentran el águila calzada (*Hieraaetus pennatus*), el búho real (*Bubo bubo*), y diversas especies de pequeños pájaros insectívoros y granívoros.

Invertebrados

La biodiversidad de invertebrados es alta, incluyendo numerosas especies de mariposas, escarabajos y hormigas, que desempeñan roles importantes en la polinización y el reciclaje de nutrientes.

2.2. DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT

El hábitat 42.841, conocido como Pinares ibéricos de pino carrasco, abarca una amplia área dentro de la región mediterránea de la Península Ibérica y las Islas Baleares. El pino carrasco (*Pinus halepensis*) es una especie adaptada a las condiciones climáticas y edáficas de esta región, y su distribución está influenciada por varios factores ambientales y humanos.

DISTRIBUCIÓN GENERAL

El pino carrasco está presente en una franja extensa que incluye tanto áreas costeras como interiores de la Península Ibérica. Su capacidad de adaptación le permite prosperar en una variedad de entornos, desde suelos pobres y pedregosos hasta tierras más fértiles.

ÁREAS COSTERAS

A lo largo de la costa mediterránea de la Península Ibérica, desde Cataluña hasta Andalucía oriental, el pino carrasco es una especie dominante. Las condiciones costeras, con suelos calizos y un clima mediterráneo característico, son ideales para el crecimiento de estos pinares. En estas zonas, el pino carrasco forma extensos bosques, a menudo intercalados con matorrales y otras especies mediterráneas.

ÁREAS MONTAÑOSAS Y PRELITORALES

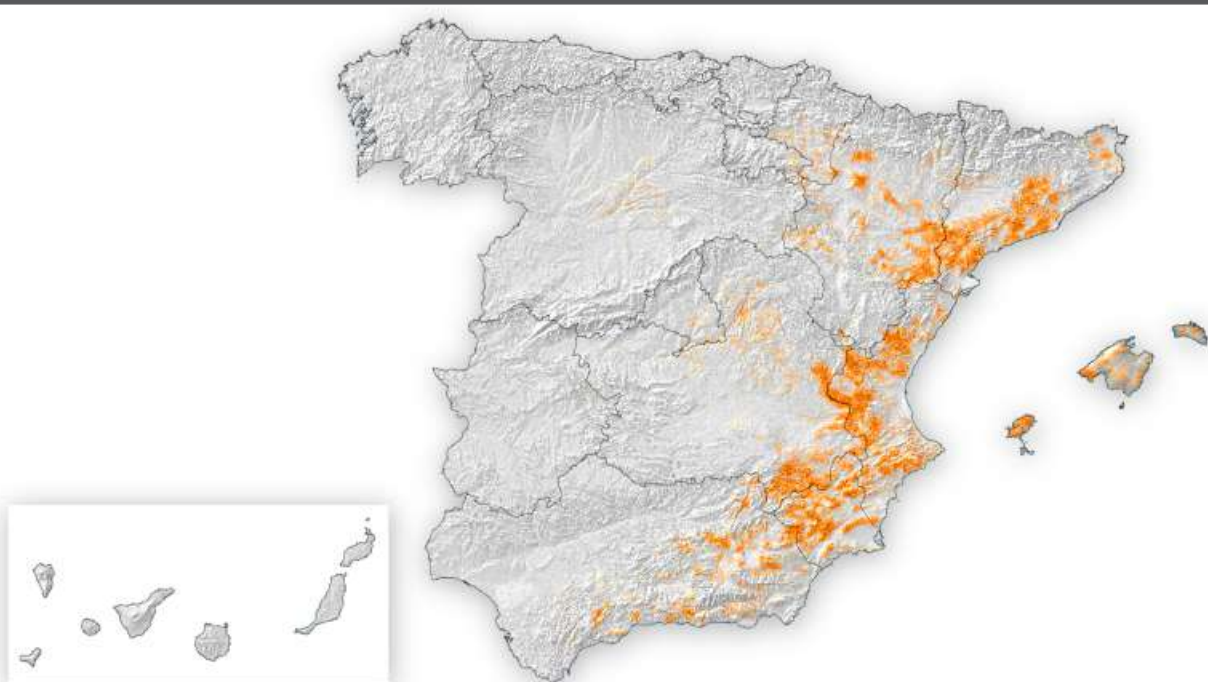
En las áreas montañosas y prelitorales, los pinares de pino carrasco también son comunes. Las sierras y montañas que bordean el Mediterráneo, como las sierras de Alicante, Murcia y Granada, proporcionan un hábitat adecuado para estos bosques. Aquí, el pino carrasco puede encontrarse en altitudes variables, adaptándose a las pendientes y suelos rocosos.

ÁREAS DEL INTERIOR

En el interior de la Península, especialmente en zonas con suelos calizos y clima semiárido, el pino carrasco sigue siendo una especie importante. Se pueden encontrar en la Meseta Central y en áreas como Aragón, donde las condiciones climáticas y edáficas aún permiten su crecimiento. En estas regiones, los pinares a menudo están asociados con otras formaciones vegetales mediterráneas, creando un mosaico de hábitats diversos.

El alcance geográfico del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO abarca el área potencial de distribución del bosque ibérico de pino carrasco (subtipo 42.841 del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, Anexo I), incluyendo las vertientes mediterráneas de las montañas catalanas y del Sistema Ibérico, la cuenca del Ebro y las cordilleras prebéticas.

Pinares de pino carrasco (*Pinus halepensis*)



3. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

El cambio climático está afectando de manera profunda y multifacética a los pinares ibéricos de pino carrasco. Durante las últimas décadas se ha registrado la ocurrencia de fuertes periodos de sequía (1998-2000, 2005-2006, 2014-2017, 2022-2024) que han afectado superficies forestales de cientos a miles de hectáreas, provocando elevadas tasas de mortalidad en el arbolado. 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.

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. 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, causando también elevadas tasas de mortalidad en superficies importantes, o importantes pérdidas de vigor en el caso de la procesionaria.

A continuación, se describen los efectos específicos del cambio climático en estos ecosistemas, considerando distintos aspectos como la salud de los árboles, la biodiversidad, los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos:



1. AUMENTO DE LA TEMPERATURA

Estrés térmico

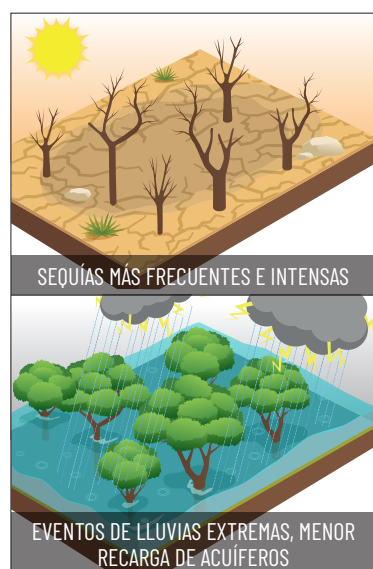
El aumento de la temperatura puede causar estrés térmico en los pinos carrascos, afectando su metabolismo y fotosíntesis. Esto puede reducir su crecimiento y vigor, haciendo a los árboles más susceptibles a otras amenazas como plagas y enfermedades.

Desplazamiento de zonas climáticas

Las zonas climáticas adecuadas para el pino carrasco podrían desplazarse altitudinal o latitudinalmente, forzando a las poblaciones de árboles a migrar hacia áreas más frescas si es posible, lo que podría llevar a una contracción de su área de distribución actual.

Alteración de las interacciones biológicas

Las especies asociadas, tanto plantas como animales, pueden responder de manera diferente al cambio de temperatura, lo que podría alterar las interacciones ecológicas y la estructura del ecosistema.



2. VARIABILIDAD EN LA PRECIPITACIÓN

Sequías más frecuentes e intensas

Las sequías prolongadas pueden reducir la disponibilidad de agua en el suelo, lo que afecta directamente la capacidad de los pinos carrascos para absorber el agua necesaria. Esto puede llevar a un aumento en la mortalidad de los árboles, especialmente de los más jóvenes y menos establecidos.

Eventos de lluvias extremas

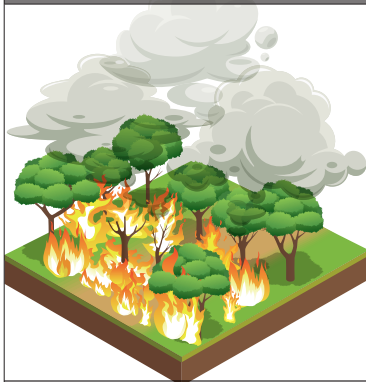
Las precipitaciones más intensas pueden causar la erosión del suelo, lo que no solo afecta la estabilidad del terreno sino también la capacidad de las raíces para anclarse y absorber nutrientes. La pérdida de suelo fértil puede dificultar la regeneración natural de los bosques.

Disminución de la recarga de acuíferos

Menor frecuencia de lluvias moderadas y más eventos extremos pueden reducir la recarga de acuíferos, afectando la disponibilidad de agua subterránea que es crucial durante los periodos secos.

MAYOR FRECUENCIA E INTENSIDAD
DE LOS INCENDIOS

CICLOS DE RECUPERACIÓN PROLONGADOS



ALTERACIÓN DEL SUELO

3. INCREMENTO DEL RIESGO Y LA SEVERIDAD DE LOS INCENDIOS FORESTALES

Mayor frecuencia e intensidad

Las condiciones más secas y cálidas favorecen la ocurrencia de incendios forestales. Incendios más frecuentes e intensos pueden devastar grandes extensiones de pinares, causando pérdida de biomasa, biodiversidad y capacidad de captura de carbono.

Ciclos de recuperación prolongados

Después de incendios severos, los pinares pueden tardar mucho tiempo en regenerarse. Las áreas quemadas son más susceptibles a la erosión y la invasión de especies no nativas que pueden dificultar la recuperación.

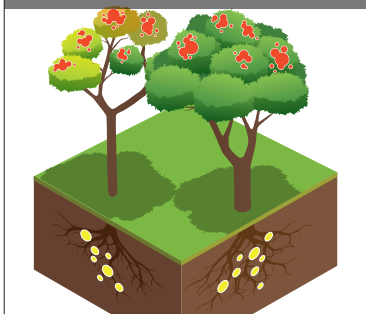
Alteración del suelo

Los incendios pueden modificar la estructura y composición del suelo, afectando la capacidad de retención de agua y nutrientes, y alterando la microbiota del suelo esencial para la salud del bosque.

AUMENTO DE PLAGAS



ENFERMEDADES FÚNGICAS E INCREMENTO
DE LA MORTALIDAD



4. PROPAGACIÓN DE PLAGAS Y ENFERMEDADES

Aumento de plagas

Las temperaturas más cálidas y las condiciones secas pueden favorecer la proliferación de plagas como la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), diferentes escolitidos (*Ips* sp., *Tomicus* sp. *Orthotomicus* sp.), el muérdago (*Viscum album*), o el nematodo de la madera del pino (*Bursaphelenchus xylophilus*).

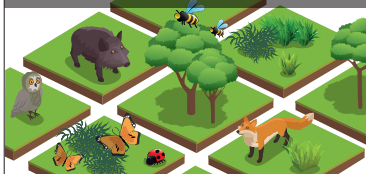
Enfermedades fúngicas

Las alteraciones en el clima pueden incrementar la incidencia de enfermedades fúngicas que afectan las raíces y la copa de los árboles. Las infecciones fúngicas pueden debilitar a los pinos, haciéndolos más vulnerables a otras amenazas.

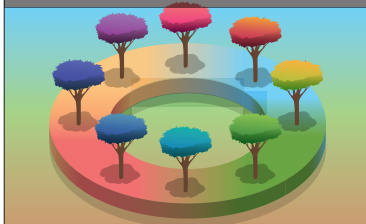
Incremento de la mortalidad

El estrés combinado de sequías, altas temperaturas y plagas/enfermedades puede llevar a una mayor mortalidad de los pinos carrascos, afectando la estructura y dinámica del bosque.

REDUCCIÓN DE HÁBITATS Y
FRAGMENTACIÓN DE LOS MISMOS



DESAJUSTE FENOLÓGICO



5. PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD

Reducción de hábitats

La contracción de los pinares debido a las condiciones climáticas adversas puede reducir los hábitats disponibles para muchas especies asociadas, desde aves hasta mamíferos y plantas subarborescentes y herbáceas.

Desajuste fenológico

Cambios en los ciclos estacionales pueden causar desajustes fenológicos, donde las especies que dependen de los pinos para alimentación o reproducción no coincidan temporalmente con los recursos necesarios, afectando las cadenas tróficas y la reproducción.

Fragmentación del hábitat

La pérdida y fragmentación de los pinares puede llevar a la fragmentación del hábitat, afectando la movilidad y viabilidad de poblaciones de fauna que dependen de estos bosques.

ALTERACIONES EN: REGULACIÓN DEL CLIMA, CICLO HIDROLÓGICO Y CALIDAD AIRE Y SUELO



6. ALTERACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Regulación del clima

La reducción en la cobertura forestal puede disminuir la capacidad de estos bosques para secuestrar carbono, exacerbando el cambio climático.

Ciclo hidrológico

La alteración de los patrones de precipitación y la pérdida de cobertura vegetal pueden afectar el ciclo hidrológico, reduciendo la infiltración de agua y aumentando la escorrentía superficial.

Calidad del aire y suelo

Los pinares contribuyen a la purificación del aire y la mejora de la calidad del suelo. La disminución de estos bosques puede deteriorar estos servicios, afectando la salud humana y la calidad ambiental.

En resumen, el cambio climático representa un desafío significativo para los pinares ibéricos de pino carrasco. Sin embargo, mediante la implementación de estrategias de gestión sostenible, restauración ecológica, protección contra incendios, monitoreo constante y una mayor investigación, es posible mitigar algunos de estos efectos y aumentar la resiliencia de estos ecosistemas vitales.

4. LA GESTIÓN FORESTAL COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN DE LOS BOSQUES AL CAMBIO CLIMÁTICO

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO está enfocado en mejorar la adaptación de los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis*) al cambio climático mediante la implementación de prácticas de gestión forestal adaptativa. Este enfoque, que puede ser extendido a otras especies y ecosistemas forestales, se basa en cinco estrategias clave: el monitoreo continuo, la migración asistida, la silvicultura de base ecohidrológica, la diversificación florística y estructural y la gestión de la regeneración post-incendio.

1. MONITOREO CONTINUO

- El estudio y seguimiento de la idoneidad de un determinado emplazamiento en base a sus condiciones ambientales actuales y futuras para albergar el hábitat de los pinares ibéricos de *Pinus halepensis*, proporciona una información de gran valor para la planificación de acciones de gestión forestal adaptativa.
- El monitoreo continuo de la salud de los pinares mediante la detección y el seguimiento de los procesos de decaimiento o pérdida de vigor, permite a los gestores forestales emprender acciones de gestión forestal de carácter preventivo o mitigador de los efectos de dichos eventos.

2. MIGRACIÓN ASISTIDA

- La migración asistida implica la reubicación de especies forestales a áreas donde las condiciones climáticas serán más favorables en el futuro. Esta técnica es crucial para asegurar la supervivencia de especies que no pueden desplazarse naturalmente a la velocidad necesaria para adaptarse a las condiciones cambiantes.
- En LIFE ADAPT-ALEPPO se han seleccionado ejemplares de pino carrasco de distintas regiones de procedencia, adaptados a condiciones más secas y se han plantado en áreas preseleccionadas que serán más adecuadas en el futuro. Esto ayudará a crear poblaciones más resilientes y asegura la supervivencia a largo plazo de la especie.

3. SILVICULTURA DE BASE ECOHIDROLÓGICA

- Este enfoque se centra en gestionar los bosques para mejorar los procesos hidrológicos, promoviendo una mayor infiltración de agua, reduciendo la escorrentía y conservando el suelo.
- En LIFE ADAPT-ALEPPO se han implementado de prácticas como la reducción moderada del número de árboles, lo que aumenta la cantidad de agua disponible en el sistema y mejora su estado hídrico. Incluso en áreas donde las precipitaciones son más elevadas, favorece la recarga de acuíferos. Este aumento del estado hídrico del ecosistema impacta en otros factores como el aumento del crecimiento y el vigor de los árboles y los rodales, mejora las propiedades del suelo y los ciclos biogeoquímicos, disminuye la sensibilidad a sequía, incrementa la resiliencia de los árboles al clima y reduce el riesgo de incendios forestales por una mayor hidratación del sistema.

4. DIVERSIFICACIÓN FLORÍSTICA Y ESTRUCTURAL

- Aumentar la diversidad de especies y la estructura del bosque es una estrategia clave para mejorar la resiliencia del ecosistema frente a las perturbaciones climáticas.
- El LIFE ADAPT-ALEPPO pretende integrar en la gestión de los pinares de pino carrasco la máxima de que cualquier tratamiento selvícola de los tradicionalmente aplicados vaya dirigido a provocar un incremento sustancial en la diversidad estructural y/o composicional, tanto a nivel de rodal como a escala de monte o paisaje. Para ello, se han seleccionado una variedad de especies autóctonas que se han integrado junto con el pino carrasco, promoviendo una estructura forestal diversa que incluya diferentes edades y tamaños de árboles. Esto crea un ecosistema más equilibrado y resistente a plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos.

5. REGENERACIÓN POST-INCENDIO

- Los incendios forestales son una amenaza creciente debido al cambio climático, y la gestión de la regeneración post-incendio es vital para restaurar los bosques afectados.
- En LIFE ADAPT-ALEPPO se han realizado un conjunto de actuaciones selvícolas innovadoras y demostrativas en bosques de pino carrasco de alta densidad afectados por grandes incendios forestales, para mejorar la resiliencia de la regeneración frente a nuevas perturbaciones, como su capacidad adaptativa frente a un escenario de aridificación climática. Para ello, se ha reducido la competencia intraespecífica en interespecífica, favoreciendo la diversificación de las masas desde estadios tempranos de desarrollo.

Estas prácticas no solo mejoran la resiliencia de los bosques, sino que también proporcionan beneficios adicionales como la conservación de la biodiversidad, la mejora de los servicios ecosistémicos y la protección del suelo y del agua. El enfoque integral del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO puede servir como modelo para otras iniciativas de gestión forestal adaptativa frente al cambio climático.





5. IMPLEMENTACIÓN DE LA SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA EN LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

5.1. BASES CIENTÍFICO-TÉCNICAS

Cuando hablamos de gestión forestal en materia hidrológica en nuestro país es importante destacar que gran parte de las actuaciones realizadas en las últimas décadas se han centrado casi exclusivamente en mejorar la respuesta frente al poder erosivo de eventos de precipitación extremos, ya sea actuando sobre la cuenca vertiente o sobre los canales de drenaje, quedando todas ellas integradas en los proyectos de restauración hidrológico-forestal. Sin embargo, los actuales contextos climático y socioeconómico requieren de estrategias de gestión que mejoren la resiliencia de los bosques y con ello su adaptación a las condiciones futuras, donde la silvicultura adaptativa debe jugar un papel crucial en la generación de información técnica a utilizar por los gestores de nuestros montes (Molina et al., 2021).

En condiciones mediterráneas y sub-mediterráneas, donde la disponibilidad hídrica es reducida, el agua se encuentra ligada estrechamente a una amplia gama de procesos y servicios ecosistémicos por lo que puede llegar a modular el crecimiento y la productividad, el estrés hídrico, el riesgo de incendio, etc. (Del Campo et al., 2017). Por ello, en este contexto, se puede desarrollar una silvicultura basada en el efecto de la gestión forestal sobre las relaciones bosque-agua (denominándose silvicultura basada en la ecohidrología). Para conocer estos efectos gestión-bosque-agua se realiza una caracterización detallada de los diferentes flujos y compartimentos que conforman el ciclo hidrológico local y cómo éstos se verán afectados por la intervención forestal (Figura 1).

Concretamente, el fundamento de esta relación gestión-bosque-agua, es que, mediante la gestión forestal, principalmente de eliminación de árboles (clares y/o clareos), se reduce la cobertura y el índice de área foliar, por tanto, se reduce la interceptación por el dosel, aumentando la precipitación neta y la energía solar (menor sombreado) que llega al suelo. Esto desencadena una serie de cambios en los procesos ecosistémicos que varían en función de, tipo de bosque, clima, intensidad y tipo de tratamiento, escala espacial (desde árbol individual a cuenca hidrográfica), efecto temporal y la variable de estudio.

5.2. SISTEMAS FORESTALES OBJETO DE APLICACIÓN Y RECOMENDACIONES GENERALES

La silvicultura basada en la eco-hidrología desarrollada en el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO busca modificar la relación bosque-agua a través de la reducción de densidad del sistema para mejorar y/o optimizar funciones y servicios ecosistémicos, principalmente relacionados con la funcionalidad ecohidrológica. Por ello, los sistemas forestales objetivo de esta acción son masas forestales densas o hiperdensas (coberturas superiores al 80%) carentes de gestión forestal donde el ciclo ecohidrológico está desequilibrado. En estos sistemas existe tangencia de copas, por lo que la interceptación aumenta, disminuyendo la precipitación neta. Por ello, la disponibilidad hídrica es baja, provocando situaciones de competencia por el recurso y estancamiento del crecimiento. Indicios de esto se pueden observar en signos de decaimiento como por ejemplo con individuos muertos dentro del sistema.

A través de la reducción de la densidad, el agua disponible en el sistema aumenta y la competencia entre individuos disminuye. Por lo que este incremento de agua, en primer lugar, se pone al servicio de los árboles como agua verde, mejorando su estado hídrico y en caso de darse situaciones donde el suelo entre en saturación y percole, se genera agua azul, favoreciendo el movimiento del agua subterránea y la recarga de acuíferos. Esta

generación de agua verde y/o azul, depende en gran parte de las características físicas y climáticas de la zona de actuación, por lo que se podría decir que cada zona tiene una vocación. En estudios anteriores, esta vocación ha sido estudiada a través de métodos muy detallados como por ejemplo en Del Campo et al., 2022a. Aunque en una primera aproximación, el agua azul se ve favorecida en zonas donde la precipitación mínima anual supera los 550 mm (Del Campo et al., 2022b), masas que se sitúen en laderas de umbría, con pendientes entre 15-30 % y con suelos bien desarrollados, con buena capacidad de retención, son proclives a generar recurso hídrico incluso con menor lluvia. Por su parte, el agua verde se favorece más en zonas llanas (<15%) y la tipología edáfica y la pluviometría no son limitantes, si bien la alta infiltrabilidad del suelo siempre es un requisito.

Paralelamente a conocer la vocación o potencialidad del sistema forestal, se debe definir la función eco-hidrológica que se pretende maximizar y/u optimizar a través del tratamiento. En el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se han considerado cuatro funciones ecohidrológicas principales: regulación, retención, provisión y uso eficiente, las cuales tienen objetivos diferentes y estructuras del sistema forestal óptimas para favorecer dicha función (ver Tabla 1).

FUNCIÓN ECOHIDROLÓGICA	OBJETIVO DE LA FUNCIÓN	ESTRUCTURA DEL SISTEMA FORESTAL
Regulación	Principalmente enfocado a la retención temporal de agua proveniente de una precipitación intensa.	Masas muy densas y con una gestión de muy baja intensidad (normalmente ausente).
Retención	Prioriza la generación de agua verde, para aumentar la resiliencia del sistema.	Masas con una competencia reducida (intervenciones moderadas) y con especies de bajo consumo hídrico, para favorecer el aumento y reserva de la humedad del suelo.
Provisión	Prioriza la generación de agua azul.	Se busca una mayor apertura de la masa con espacios libres de vegetación (intervenciones de moderadas a fuertes), aunque teniendo en cuenta el posible riesgo de erosión.
Uso eficiente	Prioriza la generación de biomasa, concretamente optimizar la relación biomasa:agua (maximizar el uso eficiente de la agua o cociente Carbono/Agua usada). Por lo que busca una silvicultura más productivista con una explotación plena del espacio y de los recursos suelo, luz y agua por parte del bosque.	Masas con los individuos repartidos homogéneamente optimizando el espacio, enfocando a la producción primaria.

Tabla 1. Funciones ecohidrológicas de interés en la gestión forestal ecohidrológica consideradas por el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO.

5.3. SISTEMAS FORESTALES OBJETO DE APLICACIÓN Y RECOMENDACIONES GENERALES

5.3.1. DISEÑO DE LAS ACTUACIONES

En el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se han considerado solo las cortas de aclareo o clara como tratamiento para reducir la densidad de pies y por tanto para aumentar el agua disponible del sistema forestal. Para notar efecto significativo, la intensidad de eliminación puede variar dependiendo de la edad y estructura del sistema, aunque de manera general se puede notar estos efectos a partir de la eliminación del 40-50% del área basimétrica (Del Campo et al., 2022b).

Este tratamiento en un monte convencional se aplicaría en toda la zona, aunque dentro del proyecto se dejaron zonas sin actuar, llamadas "control". Estas zonas control (sin actuación), sirven para poder realizar comparaciones con las zonas tratadas (con actuación). La parcela tratada (con el tratamiento) y control (sin actuación), se sitúan dentro en el mismo rodal, comparten las características físicas y climáticas y la única variable cambiante sea la estructura forestal debido al tratamiento aplicado.

El tratamiento de reducción de la densidad puede realizarse de diferentes maneras, provocando una estructura final de la masa diferente. Esto lleva a que se favorezcan más unas funciones ecohidrológicas que otras. Dentro del proyecto se han tenido en cuentas las cortas homogéneas y/o selectivas, por calles y por bosquetes. Estudios

previos han comparado distintos tipos de tratamientos de clara en términos de rendimientos hídricos, obteniendo diferencias significativas entre ellos (Hawthorne et al., 2013). Concretamente se han ejecutado cuatro tipos de tratamiento, cinco si se cuenta el control como uno de ellos, ya que también puede optimizar una de las cuatro funciones ecohidrológicas (Figura 4).

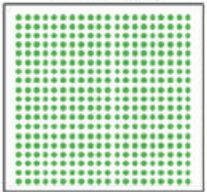
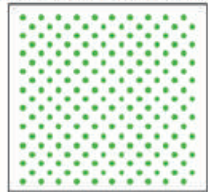
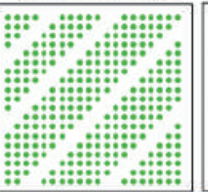
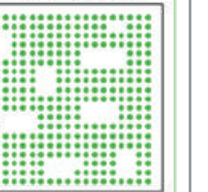
Caso 0. Control. Consiste en la masa densa o hiperdensa objetivo sin actuar. Estas masas al tener un número elevado de pies pueden servir como resistencia para minimizar impactos como riadas, aludes o impactos de rocas. Esto les otorga una mayor funcionalidad de regulación. Podrían plantearse a lo sumo cortas de mejora de muy liviana intensidad con la función de aliviar su susceptibilidad a decaimientos por sequía, lo que es, junto al modelo de combustible que ostentan, el mayor inconveniente de este tipo de estructura.

Caso 1. Tratamiento de corta homogénea y/o selectiva. Consiste en la extracción de árboles en toda la superficie del bosque. Puede hacerse de manera forma uniforme en toda la superficie (corta homogénea) o según criterios como el tamaño, la edad, estado de salud o valor (corta selectiva). Tratamientos como claras/clareos por lo alto, por lo bajo, mixtas y las cortas sanitarias se clasificarían dentro de este caso 1. Estos tratamientos, dejan de manera general los árboles repartidos homogéneamente en el espacio. Por ello tienen un efecto comparable sobre las distintas funciones ecohidrológicas. Concretamente aumentan el agua verde al disminuir la competencia por el recurso, esto favorece la relación biomasa:agua, mejorando el crecimiento y vigor de la masa.

Caso 2a. Tratamiento de corta por calles orientadas con criterios intrínsecos de la masa. Consiste en eliminar filas de árboles dejando franjas de vegetación intactas, generalmente alineadas con la pendiente o las líneas de plantación de la repoblación. Este tratamiento mantiene a los árboles en competencia (excepto los que están en el borde de la calle) y genera zonas abiertas (sin vegetación), lo que favorece la producción de agua azul. Por ello, frente a un control, puede tener efectos medios-altos en cuanto a la función de retención y en menor grado de uso eficiente.

Caso 2b. Tratamiento de corta por calles orientadas a la producción de agua. Al igual que en el Caso 2a, consiste en eliminar filas de árboles dejando franjas de vegetación intactas, aunque la orientación y tamaño de las calles se optimizan para aumentar el sombreado en la franja abierta y por tanto para reducir la evaporación asociada al suelo. Por ello las calles se orientan de este a oeste y el tamaño de la calle se calcula teniendo en cuenta la altura dominante de la masa (a) y el ángulo de declinación solar (α) al mediodía en los equinoccios. Con estos datos y a través de la fórmula: $b = a / \tan(\alpha)$, se obtiene la anchura óptima de la calle para optimizar su sombreado (b). Este tratamiento tiene el mismo efecto que el Caso 2a, aunque al optimizar mejor el sombreado, puede tener un mayor impacto positivo en la función de provisión.

Caso 3. Tratamiento de corta por bosquetes. Consiste en la corta de agrupaciones de árboles de manera circular o cuadrada, dejando parches desarbolados a lo largo del monte. Este tratamiento combina la producción de agua verde y agua azul, debido a que genera amplias zonas de vegetación en el borde a la vez que genera espacios desarbolados, por ello puede favorecer mayormente las funciones de retención y provisión frente a un control.

	Sin tratamiento	Con tratamiento de reducción de la densidad (claras o clareos)			
	Caso 0. Control	Caso 1. Homogéneo y/o selectivo	Caso 2a. Calles orientadas con criterios intrínsecos	Caso 2b. Calles orientado a la producción de agua	Caso 3. Bosquetes
					
Funciones ecohidrológicas	Caso 0	Caso 1	Caso 2a	Caso 2b	Caso 3
Regulación	+++	++	+*	+*	+
Retención	+	+++**	++	++	+++
Provisión	-	+	++	+++	++
Uso eficiente	-	+++	++	++	+

*La función de regulación puede no ser efectiva en las actuaciones por calles, cuando las calles se ejecutan orientándolas a favor de la máxima pendiente, lo que puede generar circulación preferente; ** El homogéneo tiene una buena respuesta a la retención cuando la intensidad de la actuación es alta

Figura 1. Tipos de tratamientos de base ecohidrológica implementados en el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO junto con el efecto que tienen sobre las cuatro funciones ecohidrológicas. Los símbolos indican el efecto del tipo de tratamiento sobre la función ecohidrológica, de mayor a menor: +++, ++, + y -.

Finalmente, con el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se trataron (T) 44.22 hectáreas y se han dejado 25.22 hectáreas de control (C), repartidas en 9 rodales, tal y como se indica en la Tabla 2.

TRATAMIENTO	RODAL	CCAA	SOCIO	INTENSIDAD CORTA (%)	SUPERFICIE (HA)	
					T	C
Caso 1	Can Ponç	Cataluña	UdL	50	5.50	1.50*
	Nerpio 60%	Castilla-La Mancha	UCLM	63	2.10	1.58**
Total					7.60	3.08
Caso 2a	Camarasa	Cataluña	UdL	58	9.08	3.29
	Sierra de Luna	Aragón	UPV	33	8.42	7.09
	La Hunde	Valencia	UPV	66	2.49	1.38
	Almansa	Castilla-La Mancha	UCLM	70	8.15	9.18
Total					28.14	20.94
Caso 2b	Can Ponc	Cataluña	UdL	50	1.00	1.50*
	Fajas 1	Aragón	UPV	16	2.70	0.60
	Fajas 2	Aragón	UPV	57	2.68	0.62
Total					6.38	2.72
Caso 3	Nerpio huecos	Castilla-La Mancha	UCLM	44	2.10	1.58**
Total					2.10	1.58
TOTAL					44.22	25.24

Tabla 2. Rodales demostrativos ejecutados dentro del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO junto con el tipo de tratamiento (Caso 1, 2a, 2b y 3) y la intensidad de eliminación de pies (%) que se implementó, el socio responsable del rodal y la superficie tratada y control (Caso 0, sistema forestal sin tratamiento).

5.3.2. PROTOCOLO DE SEGUIMIENTO

Para el establecimiento de un rodal experimental de silvicultura basada en la ecohidrología y su posterior seguimiento se han seguido los siguientes pasos:



En primer lugar, se define el sistema forestal sobre el que se va a actuar y se establece el diseño de tratamiento más óptimo para favorecer la función ecohidrológica objetivo. Esta parte se desarrolla en los apartados 6.2. y 6.2.1. A continuación, para hacer una planificación del seguimiento se debe tener en cuenta: las dimensiones y forma del muestreo, las mediciones que se realizarán, la periodicidad con las que hay que realizarlas y si se realizan de manera puntual o continua.

a) Dimensiones y forma de las parcelas de muestreo

El muestreo se debe realizar tanto en la zona tratada como en la zona control. Se establecerá un muestreo por cada rodal, repetición, bloque o tratamiento (en todas y cada una de estas unidades se entiende una superficie continua de terreno de características homogéneas).

Este muestreo debe representar y recoger toda la variabilidad del sistema forestal. Para ello se recomienda que en parcelas de 1 a 3 ha se muestre un 10% de la superficie y en parcelas de más de 5 ha, se muestre un 5%. Aunque las dimensiones pueden variar siempre y cuando se asegure que la información recogida represente de manera fiable la masa forestal estudiada.

Por otro lado, se valoran dos formas de parcelas de muestreo: circulares o en transectos, que variará en función de la estructura del sistema:

- Circular. Para las estructuras más homogéneas como el control (Caso 0), el tratamiento homogéneo/selectivo (Caso 1) y en todos los rodales en pre-tratamiento se establecerán parcelas de inventariación circular. Se recomienda que para rodales de establecer mínimo 3 parcelas de muestreo de 10 metros de radio, en caso de tener una alta densidad como una situación de regenerado post-incendio el radio puede reducirse a 5 metros.
- Transecto. Si hay mayor irregularidad o un patrón muy marcado, como tras la ejecución de los tratamientos Caso 2a, Caso 2b y Caso 3, se realizará el inventario en forma de transecto longitudinal. En el caso de los tratamientos por calles, este transecto será perpendicular a la orientación de las calles (Caso 2a y Caso 2b) y en el caso de los bosquetes (Caso 3), el transecto pasará por el centro de estos. El ancho de la parcela se recomienda que sea entre 6 y 8 metros y el largo se determinará en función de la superficie del rodal. Es muy importante recoger la interfaz entre la vegetación y la calle o los bosquetes.

b) Momentos de muestreo.

Para evaluar y hacer el seguimiento de los tratamientos se realizará un muestreo pre-tratamiento, para conocer la situación inicial. Éste se realiza en los rodales control y tratamiento. Tras la ejecución de los trabajos se realizará otro muestreo (post-tratamiento) con el objetivo de analizar cuál ha sido la intensidad del tratamiento. Este muestreo post-tratamiento sólo se realiza en los rodales que han sido tratamiento (no en los controles). Y una vez se realice este muestreo, se realizará un muestreo de monitoreo o seguimiento anual (cada año) tanto en el rodal tratado como en el control, con el objetivo de ver la evolución del sistema forestal en ambas situaciones.

c) Mediciones puntuales y en continuo.

Las mediciones puntuales se realizan en diferentes momentos temporales y cada una de ellas tendrá un objetivo de caracterización diferentes. A continuación, se muestra las mediciones, momentos y objetivos a realizar (Tabla 3).

	Caracterización fisiográfica-edáfica-planta	Caracterización dasométrica	Caracterización dendrocronológica	Caracterización arbustiva
MEDICIÓN	- Coordenadas X e Y - Altitud - Pendiente - Orientación - Análisis de suelo para la textura y pedregosidad (si es posible)	Se medirán todos los árboles dentro de las parcelas de muestreo. Se medirán: - Número de pies mayores y menores - Altura - Diámetro	Extracción de cores principalmente para comparar el efecto del tratamiento.	En la parcela circular se realizarán 2 transectos de 1 metro de ancho en los diámetros cruzados de presencia/ausencia de especies en el estrato arbustivo para inferir el porcentaje de cobertura. Se realizarán de N-S y E-O. Y en la parcela rectangular, el muestreo solo será un transecto de un metro de ancho sobre las aristas longitudinales del transecto (por lo que el largo vendrá determinado por ellas).
OBJETIVO	Visión general del rodal. Evolución de la masa: interceptación principalmente.	Evolución de la masa	Cambio que ha producido el tratamiento en el desarrollo de la masa respecto a su "no gestión".	Desarrollo relativo del estrato arbustivo
 Solo una vez: a los 2-3 años del tratamiento Solo una vez: pre-tratamiento Pre-tratamiento, post tratamiento y anual				

Tabla 3. Tipos y momentos de mediciones puntuales tenidos en cuenta para realizar el seguimiento de los rodales (tratados y controles) de selvicultura basada en la ecohidrología.

Por otro lado, las mediciones en continuo se basan en sensorización (Figura 5). Esto aumenta la complejidad técnica y eleva el coste económico por la adquisición del equipo. El objetivo de estas mediciones es la cuantificación del ciclo eco-hidrológico. La medida más importante es el suelo, donde se pueden monitorear el contenido de humedad, la temperatura y el potencial matricial, siendo la humedad la principal. Seguidamente del suelo es muy interesante hacer un monitoreo meteorológico. Por último, en función de la vocación del sistema

forestal merecerá la pena desplegar piezómetros, si el sistema es potencialmente productor de agua azul o sensores de flujo de savia, si se favorece más el agua verde.

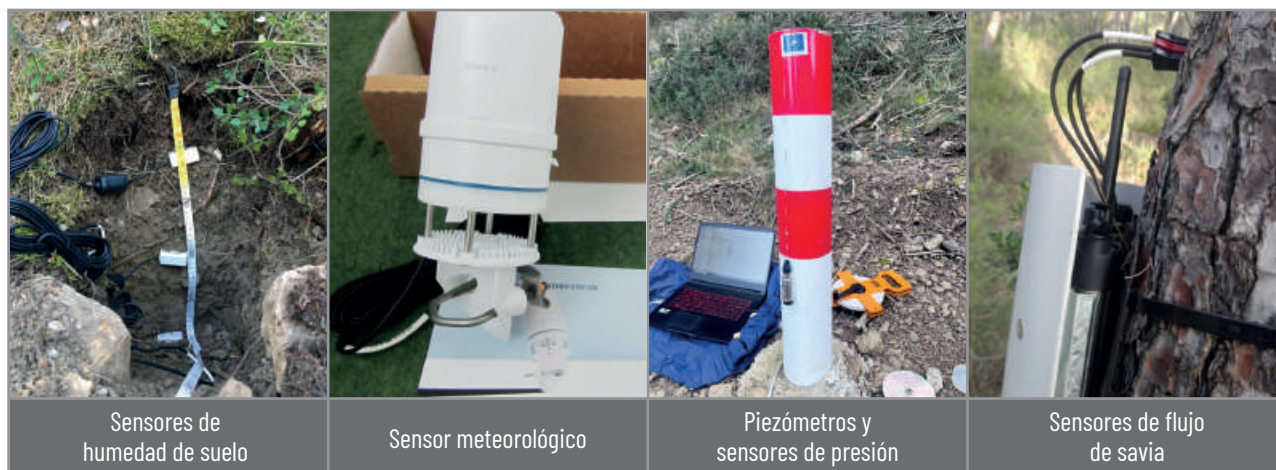


Figura 2. Sensorización recomendable para el seguimiento de los efectos del tratamiento en los procesos hidrológicos.

Además, estos datos, tanto puntuales como en continuo, podrán servir como datos de entrada para hacer simulaciones en diferentes situaciones climáticas y poder valorar el desarrollo de las masas y cómo es el efecto en el estado actual y futuro del sistema forestal.

5.3.3. RESULTADOS

Los tratamientos selvícolas basados en la ecohidrología son de gran relevancia en el Mediterráneo donde uno de los limitantes del crecimiento y supervivencia de los sistemas forestales es la disponibilidad hídrica. Por ello este tipo de actuación es clave para la adaptación de las masas de *Pinus halepensis* ante el cambio climático.

En los análisis preliminares de los resultados obtenidos dentro del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO, se ha estudiado el impacto del tratamiento en el movimiento de agua profunda. Concretamente se está monitoreando la columna de agua en la salida de dos cuencas pareadas (una cuenca tratada y otra cuenca control) situadas en Sierra de Luna (Zaragoza). El tratamiento que se ha implementado es un tratamiento por calles orientadas con criterios intrínsecos de la masa (Caso 2a). Tras el monitoreo se ha observado un mayor movimiento de agua en la cuenca tratada frente a la cuenca control, tanto en días que se ha registrado agua como en el flujo medio del periodo monitoreado. Esto muestra la capacidad del tratamiento Caso 2a en favorecer la función ecohidrológica de provisión de agua profunda (Figura 6).

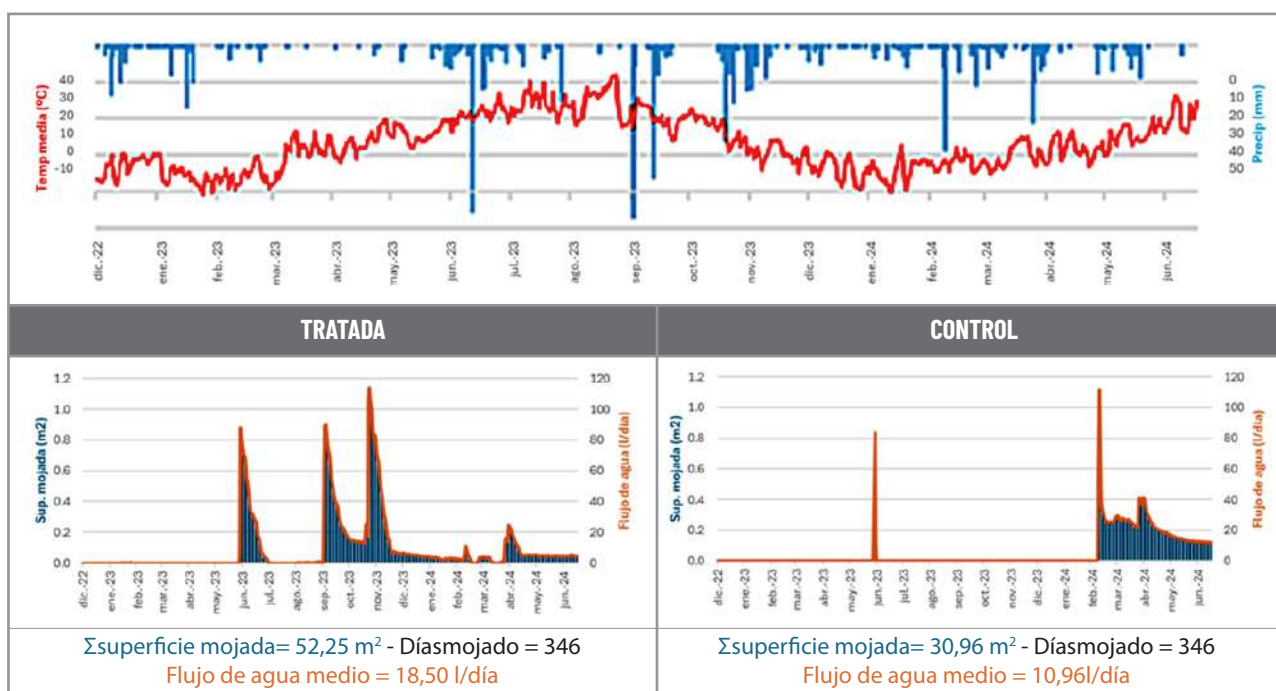


Figura 3. Dinámica de la superficie mojada detectada a la salida de cada cuenca (control y tratada) situadas en Sierra de Luna, donde el tratamiento es por calles orientadas con criterios intrínsecos de la masa (Caso 2a).

Por otro lado, también es interesante comparar la efectividad de dos tratamientos diferentes. Para ello se han implementado dos rodales con diferentes tratamientos: homogéneo (Caso 1) y bosquetes (Caso 3) en Nerpío (Albacete). Se observa como el Caso 3 alcanza picos más altos de contenido de humedad en las tres profundidades monitoreadas (5, 20 y 50 cm) y la caída de esta humedad a lo largo de los días posteriores a una lluvia es menor, lo que implica una menor pérdida de agua y una mayor conservación de ésta durante más tiempo. Esto implica que cuando se produzca otra precipitación, el suelo del Caso 3 llegará antes a saturación que el caso 1. Esto hace que el Caso 3 sea más efectivo en la provisión y retención que el Caso 1 (Figura 7).

Los siguientes pasos en los análisis que se realizarán en el seno del proyecto implicarán desarrollar una valoración del efecto de los cuatro tipos de tratamientos sobre las funciones ecohidrológicas. Y valorar cómo estos efectos aumentarán la resiliencia de las pasas y por tanto favorecerán su adaptación ante el cambio climático.

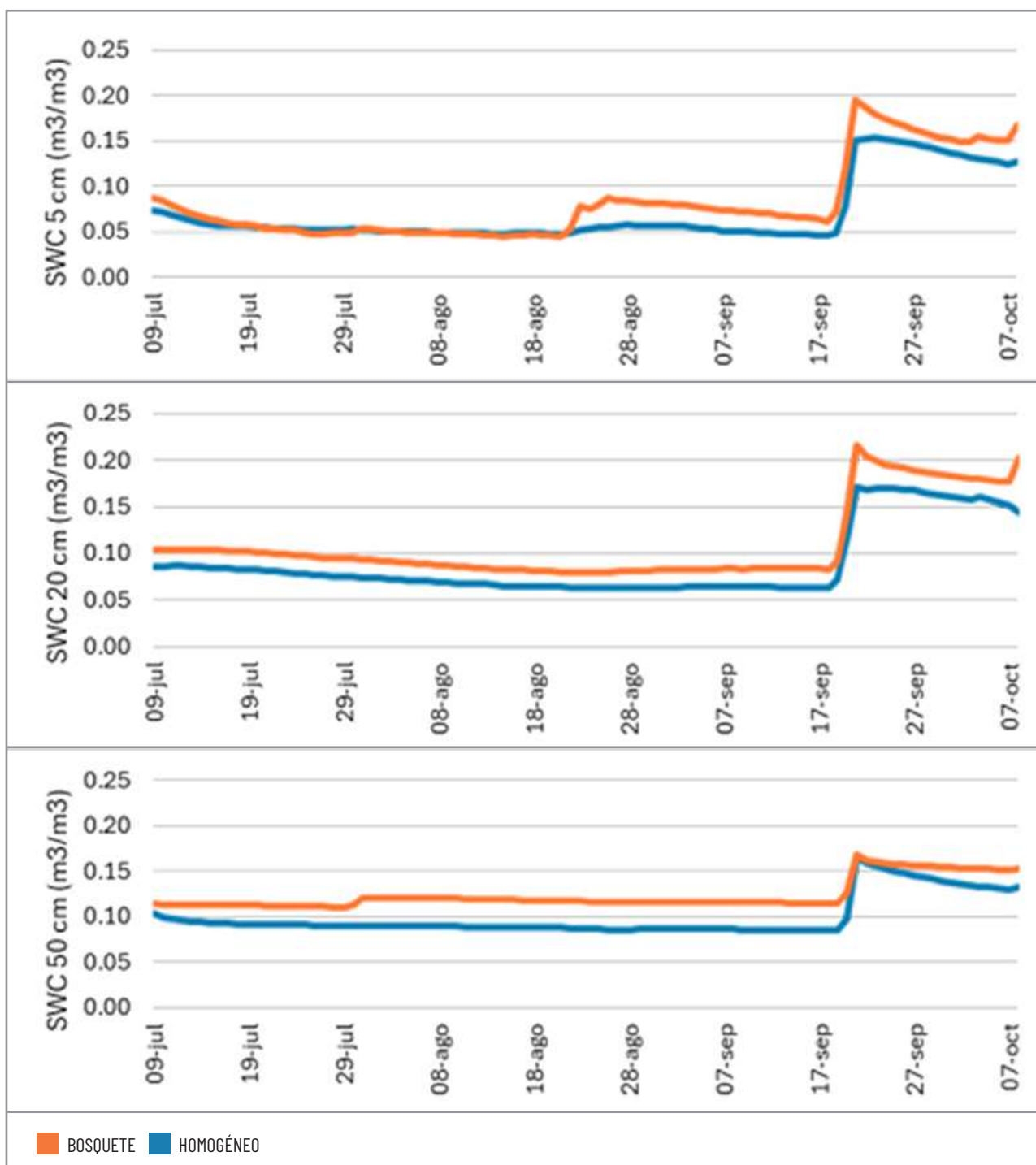


Figura 4. Dinámica del contenido de humedad a tres profundidades (5, 20 y 50 cm) en dos rodales, Nerpío-60 % con un tratamiento homogéneo (Caso 1) y Nerpío-huecos con un tratamiento por bosquetes (Caso 3).

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis de costes de los trabajos de silvicultura con base eco-hidrológica se han tenido en cuenta distintas tarifas, rendimientos de las obras desarrolladas en el LIFE ADAP-ALEPPO, proyectos de la misma tipología, precios de mercado actuales, etc.

Para estos trabajos, se ha de tener en cuenta varios aspectos importantes, en relación con los costes:

- Tipo de maquinaria utilizada
- Apertura de caminos
- Complejidad orográfica (principalmente por la pendiente)
- Densidad del rodal o tipo de masa
- Intensidad de la corta
- Gestión de la madera y de los restos

Así, el coste medio por hectárea de superficie y teniendo en cuenta trabajos de corta, poda y gestión de residuos vegetales (astillado de finos y tronzado de gruesos), se estima entre 2200 y 4.500 €/ha:

- 3500 €/ha trabajos mecanizados por calles en masa de latizal bajo con intensidad media de corta
- 4500 €/ha trabajos mecanizados por calles en masa de latizal bajo con intensidad alta de corta
- 2200 €/ha trabajos mecanizados en masa de latizal alto y fustal
- 3000 €/ha para trabajos manuales

Para más detalle, se puede consultar la herramienta o catálogos de costes de implementación de medidas de adaptación desarrollada en el seno del Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO y disponible en el siguiente enlace: <https://adaptaleppo.eu/apps/> o el catálogo: <https://adaptaleppo.eu/tablas-acciones/>.

7. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

- Analizar la vocación del sistema forestal
- Priorizar las funciones ecohidrológicas objetivo y por tanto definir el tipo de tratamiento más óptimo.
- Valorar si la función ecohidrológica objetivo es viable según la vocación del sistema forestal objetivo.
- Valorar si el tratamiento seleccionado es factible técnicamente.

8. BIBLIOGRAFÍA

Del Campo, A. D., González-Sanchis, M., Lidón, A., García-Prats, A., Lull, C., Bautista, I., ... & Francés, F. (2017). Ecohydrological-based forest management in semi-arid climate. Ecosystem services of headwater catchments, 45-57.

Del Campo García, A.D., González Sanchis, M.C., Pérez Romero, J., Molina Herrera, A.J., Blanco Cano, L., Sánchez Moreno, I. Y De La Fuente Martín, B. (2022a). La silvicultura ecohidrológica como herramienta de gestión multifuncional y adaptativa: aplicación práctica en la Sierra Norte de Madrid. 8º Congreso Forestal Español. <https://8cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/actas/8CFE-971.pdf>

Del Campo, A. D., Otsuki, K., Serengil, Y., Blanco, J. A., Yousefpour, R., & Wei, X. (2022b). A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. Forest Ecology and Management, 519, 120324.

González-Sanchis, M. a, Del Campo, A.D., Molina, A.J., Fernandes, T. & Tarcisio J.G. (2015). Modeling adaptive forest management of a semi-arid Mediterranean Aleppo pine plantation. Ecol. Model. 308, 34-44.

Hawthorne, S. N., Lane, P. N., Bren, L. J., & Sims, N. C. (2013). The long term effects of thinning treatments on vegetation structure and water yield. Forest Ecology and Management, 310, 983-993.

Molina, A. J., Navarro-Cerrillo, R. M., Pérez-Romero, J., Alejano, R., Bellot, J. F., Blanco, J. A., ... & del Campo, A. D. (2021). SilvAdapt. Net: A Site-Based Network of Adaptive Forest Management Related to Climate Change in Spain. Forests, 12(12), 1807.

Troendle, C.A., Wilcox, M.S., Bevenger, G.S., Porth, L.S., 2001. The Coon Creek Water Yield Augmentation Project: implementation of timber harvesting technology to increase streamflow. For. Ecol. Manag. 143, 179-187. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00516-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00516-8)



LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/001809)

"ADAPTIVE MANAGEMENT OF MEDITERRANEAN PINUS HALEPENSIS FORESTS IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE"

GUÍA TÉCNICA



IMPLEMENTACIÓN DE LA SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA EN LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO



Universitat
de Lleida



Universidad de
Castilla-La Mancha



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA