

R1.3 Guía de selvicultura enfocada a la producción de servicios ecosistémicos

Autoría:

Laura Arnal Roig (Grupo Re ForeST. Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València)

Antonio Dámaso del Campo García (Grupo Re ForeST. Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València)

Antonio Luis Lidón Cerezuela (Grupo Re ForeST. Dpto. de Química. Universitat Politècnica de València)

Javier Pérez Romero (Grupo Re ForeST. Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València)

GREEN BOOST cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU



VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Financiado por:



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

Socios del proyecto:



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



COLEGIO OFICIAL DE
INGENIEROS DE MONTES

ÍNDICE

1. Introducción	4
2. Marco de referencia	4
2.1. Pinares semiáridos de <i>Pinus halepensis</i> y gestión adaptativa	4
2.2. Enfoques actuales de gestión en <i>Pinus halepensis</i>	6
2.3. Marco regional de referencia: Región de Murcia	7
3. Enfoque metodológico	9
3.1. Base territorial de aplicación y unidades de gestión	10
3.2. Enfoque ecohidrológico de la gestión forestal	11
3.3. Multifuncionalidad forestal y marco CAFE	11
3.4. Técnicas robustas de cuantificación y simulación	12
3.5. Apoyo a la decisión mediante la DSS CAFE	13
4. Configuración, calibración y aplicación del modelo Biome-BGC MuSo	13
4.1. Variables de entrada	13
4.1.1. Datos dasométricos	14
4.1.2. Datos meteorológicos	15
4.1.3. Datos edáficos	15
4.1.4. Variables topográficas	17
4.1.5. Parametrización ecofisiológica de la especie	17
4.2. Construcción de los inputs para calibración con parcelas reales	18
4.3. Construcción de los inputs para simulación	19
4.4. Calibración y validación del modelo	20
4.4.1. Procedimiento general de calibración	20
4.4.2. Herramienta de calibración y ajuste de parámetros	22
4.4.3. Evaluación de ajuste del modelo	23
5. Evaluación multiobjetivo mediante la DSS CAFE	25
5.1. Construcción de los casos de simulación para la DSS CAFÉ	25
5.2. Objetivos priorizados y parámetros de gestión	26
5.3. Síntesis de la situación de referencia y comportamiento funcional de los itinerarios	28
6. Pautas selvícolas para la producción de servicios ecosistémicos	30
6.1. Itinerario 1 – Resistencia o resiliencia productivo maderable	31
6.2. Itinerario 2 – Resistencia o resiliencia productivo biomasa	34
6.3. Itinerario 3 – Transición productivo biomasa	36

6.4.	Itinerario 4 – Resistencia conservación	39
6.5.	Itinerario 5 – Resiliencia conservación	41
6.6.	Itinerario 6 – Transición conservación	43
7.	Consideraciones finales.....	46
8.	Bibliografía.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores medios de las variables edáficas por itinerario de gestión forestal sostenible (GFS).....	17
Tabla 2.	Variables de entrada utilizadas en los casos de calibración MP36-05 y MP36-06.	18
Tabla 3.	Variables de entrada utilizadas en los casos de los itinerarios.	19
Tabla 4.	Parámetros ecofisiológicos calibrados e incorporados al archivo ecofisiológico de <i>Pinus halepensis</i>	23
Tabla 5.	Resultados de ajuste de la solución ecofisiológica seleccionada para el carbono acumulado en biomasa vegetal (vegC) en las parcelas de calibración.	24
Tabla 6.	Valores de referencia de la situación sin gestión para los itinerarios 1–4.....	28
Tabla 7.	Soluciones recomendadas para el itinerario 1.....	32
Tabla 8.	Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 1.....	33
Tabla 9.	Soluciones recomendadas para el itinerario 2.....	35
Tabla 10.	Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 2.....	36
Tabla 11.	Soluciones recomendadas para el itinerario 3.....	37
Tabla 12.	Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 3.....	38
Tabla 13.	Soluciones recomendadas para el itinerario 4.....	39
Tabla 14.	Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 4.....	40
Tabla 15.	Soluciones recomendadas para el itinerario 5.....	42
Tabla 16.	Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas del itinerario 5.....	43
Tabla 17.	Soluciones recomendadas para el itinerario 6.....	45
Tabla 18.	Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas del itinerario 6.....	45

2

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Zonificación de unidades de gestión en las masas de <i>Pinus halepensis</i> de la Región de Murcia.....	10
-----------	---	----

Figura 2. Distribución de *Pinus halepensis* y localización de las parcelas de campo en la Región de Murcia..... 14

1. INTRODUCCIÓN

Los pinares semiáridos dominados por pino carrasco (*Pinus halepensis*) constituyen el componente forestal más representativo de la Región de Murcia, tanto por su extensión como por su función protectora frente a la erosión, la desertificación y el riesgo de incendios. La información oficial disponible indica que esta especie representa aproximadamente el 80 % de la superficie forestal arbolada regional, con más de 248.000 ha según el Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4, 2012), lo que condiciona de forma decisiva la política forestal regional y las prioridades de manejo.

En este contexto, el presente entregable tiene por objeto formular **pautas selvícolas generales orientadas a la producción y mantenimiento de servicios ecosistémicos** en las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia. El documento no parte de una caracterización territorial nueva, sino de la zonificación previamente desarrollada en el entregable R1.1 del proyecto GREEN BOOST, en el que la superficie ocupada por la especie fue clasificada mediante la integración de la estrategia adaptativa, la orientación funcional de la masa y la viabilidad de gestión. Sobre esa base territorial, este trabajo desarrolla una propuesta de orientación selvícola aplicada a los distintos itinerarios definidos, con especial atención a la adaptación al cambio climático y a la multifuncionalidad forestal.

El documento se enmarca en una visión de la gestión forestal como herramienta de **adaptación ecosistémica**. En sistemas como los pinares semiáridos murcianos, sometidos a fuerte limitación hídrica, aumento del riesgo de incendio y creciente vulnerabilidad frente a perturbaciones, la silvicultura no debe entenderse únicamente como una herramienta de aprovechamiento, sino como un instrumento de intervención sobre aquellos rasgos del rodal que condicionan su persistencia futura. Desde esta perspectiva, la regulación de la densidad y la consideración explícita de los servicios ecosistémicos constituyen elementos centrales de la propuesta metodológica y técnica desarrollada en este entregable.

4

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Pinares semiáridos de *Pinus halepensis* y gestión adaptativa

La silvicultura aplicada a pinares mediterráneos semiáridos debe situarse, en primer lugar, en el marco de la gestión forestal sostenible definido por la Ley 43/2003, de Montes, que entiende la silvicultura como el conjunto de técnicas dirigidas a la conservación, mejora, aprovechamiento y regeneración o restauración de las masas forestales, e integra estas actuaciones dentro de instrumentos de planificación y ordenación forestal más amplios (Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, 2003). En ese mismo marco normativo se encuadran, entre otros, los Proyectos de Ordenación de Montes, los Planes Dasocráticos y los PORF, así como la obligación de las comunidades autónomas de elaborar planes anuales de prevención, vigilancia y extinción frente al riesgo general de incendios forestales (Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, 2003). Desde esta perspectiva, la intervención selvícola no se limita a una lógica productiva, sino que se orienta también al

mantenimiento de la persistencia del ecosistema, a la reducción de su vulnerabilidad y a la conservación de sus funciones ecológicas, protectoras y sociales (Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, 2003).

En el ámbito mediterráneo semiárido, estos objetivos adquieren una relevancia particular debido a la fuerte limitación hídrica, la elevada irregularidad climática, la pobreza edáfica y la baja productividad de muchas de estas masas. En este contexto, *Pinus halepensis* Mill. constituye una de las especies más características, tanto por su amplia distribución natural como por su intenso uso histórico en repoblaciones protectoras, favorecido por su rusticidad, su tolerancia relativa a la aridez y su capacidad de colonizar ambientes difíciles (Alsanousi et al., 2025; Manrique-Alba et al., 2020). En buena parte del sureste ibérico, estas repoblaciones se establecieron con densidades elevadas y con un objetivo prioritario de rápida cobertura del suelo y control de la erosión, más que de producción maderera o de desarrollo de estructuras complejas y multifuncionales (Del Rio et al., 2008; Manrique-Alba et al., 2020).

Sobre este legado histórico se han superpuesto, en las últimas décadas, dos procesos de gran importancia. Por un lado, el abandono rural y la pérdida de usos tradicionales han favorecido la expansión de la superficie forestal y la densificación de la vegetación leñosa, especialmente en espacios previamente ocupados por usos agrarios o silvopastorales (Lasanta et al., 2021). Por otro, el empeoramiento del contexto climático ha incrementado la exposición de estos sistemas al estrés térmico e hídrico. El Mediterráneo es considerado un *hotspot* de cambio climático, con aumento de olas de calor, mayor aridificación y condiciones más favorables para grandes incendios y perturbaciones severas (Ali et al., 2022). A escala europea, además, el *Joint Research Centre* ha destacado que 2023 se situó entre los peores años de superficie quemada en la Unión Europea desde 2000, con especial afección al ámbito mediterráneo (Joint Research Centre, 2024). En estos pinares, el denominador común de todos estos procesos es la limitación por agua; por ello, en sistemas forestales de baja productividad y escasa rentabilidad, la ausencia prolongada de tratamientos conduce con frecuencia a masas muy densas, homogéneas y poco gestionadas, con repercusiones directas sobre la resiliencia, el balance hídrico, el riesgo de incendio y la sanidad forestal (González-Sanchis et al., 2019).

Desde un punto de vista selvícola, la bibliografía distingue en pino carrasco varias tipologías frecuentes: masas naturales, generalmente más abiertas en ambientes muy áridos; masas de repoblación, a menudo coetáneas y densas; y masas regeneradas tras incendio, que pueden alcanzar densidades extremadamente elevadas durante las primeras fases de desarrollo (Del Rio et al., 2008). En ambientes semiáridos basales suelen describirse masas más abiertas y de desarrollo moderado, mientras que en ambientes algo menos limitantes pueden aparecer masas más densas y con algo más de interés productivo relativo (Del Rio et al., 2008). En cualquier caso, en la práctica contemporánea la gestión de *Pinus halepensis* es esencialmente multicriterio: protección del suelo, reducción de la vulnerabilidad frente a sequía y plagas, prevención de incendios, mantenimiento de la funcionalidad ecológica y mejora de la heterogeneidad estructural, mientras que la producción maderera suele ocupar un papel secundario (Del Rio et al., 2008). De hecho, en muchas zonas la madera obtenida se orienta principalmente a trituración, pasta o

tablero, lo que condiciona notablemente la rentabilidad de los tratamientos (Del Rio et al., 2008).

2.2. Enfoques actuales de gestión en *Pinus halepensis*

A la luz de las condiciones ecológicas, estructurales y funcionales descritas en el apartado anterior, la bibliografía reciente coincide en señalar que la gestión de los pinares semiáridos de *Pinus halepensis* debe orientarse hacia enfoques de silvicultura adaptativa o *adaptation forestry*. Este enfoque se entiende como una gestión iterativa dirigida a aumentar la resistencia, la resiliencia y la capacidad de ajuste de la masa frente al cambio climático mediante tratamientos selvícolas, seguimiento e indicadores de respuesta (Seneviratne et al., 2021). En estos pinares, dicha orientación se concreta actualmente en varias líneas complementarias:

- La reducción de competencia mediante claras y clareos, con el objetivo de disminuir el estrés hídrico y mejorar el vigor individual y colectivo de la masa (Manrique-Alba et al., 2020).
- La modificación preventiva de combustibles, combinando reducción de densidad, poda y gestión de restos para disminuir la continuidad vertical y horizontal del combustible y limitar el riesgo de fuego de copas (Alvarez et al., 2012; Del Rio et al., 2008; Piqué & Domènech, 2018).
- La ecohidrología aplicada a la silvicultura, ajustando la intensidad y el patrón espacial de tratamiento para optimizar la partición de la lluvia, la disponibilidad de “agua verde” para la vegetación y, en determinados contextos, favorecer procesos de recarga o “agua azul” (Díaz-Montero et al., 2024).
- La diversificación estructural y, cuando el contexto ecológico lo permite, también florística, favoreciendo mosaicos y mezclas que reduzcan la homogeneidad y aumenten la estabilidad del rodal y del paisaje (Díaz-Montero et al., 2024).
- Finalmente, la gestión del regenerado post-incendio. En esta fase, la serotinia y la extraordinaria capacidad de regeneración de *Pinus halepensis* pueden generar densidades superiores a 100.000 pies/ha en pocos años, incrementando de forma muy acusada la competencia y la continuidad del combustible. Por ello, se están ensayando tratamientos de reducción muy intensa, del orden del 90–95 % de la densidad, con objeto de evaluar efectos sobre crecimiento, suelo, biodiversidad y viabilidad futura de la masa (Díaz-Montero et al., 2024).

La evidencia científica que sustenta este enfoque es consistente. En pinares densos sometidos a calentamiento y sequía, la competencia por el agua intensifica el estrés y favorece procesos de decaimiento y mortalidad (Manrique-Alba et al., 2020). Los ensayos de larga duración en repoblaciones semiáridas de pino carrasco muestran que las claras mejoran el crecimiento, reducen la dependencia del árbol respecto al estrés hídrico y aumentan la resiliencia tras episodios de sequía, especialmente cuando las intervenciones tienen suficiente intensidad (Manrique-Alba et al., 2020). Del mismo modo, se ha comprobado que los tratamientos selvícolas pueden reducir el potencial de fuego de copas, aunque su eficacia depende en gran medida de cómo se maneje el combustible de superficie tras la intervención (Alvarez et al., 2012; Piqué & Domènech, 2018).

La relación entre densificación e incendios debe entenderse además en un marco más amplio. En el Mediterráneo, el riesgo de incendio depende de la interacción entre meteorología, sequía, topografía, continuidad de combustible e interfaz urbano-forestal (Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C), 2023). En condiciones de sequía prolongada y olas de calor, la reducción de humedad del combustible eleva drásticamente la capacidad de propagación y la severidad potencial del fuego. Por ello, las políticas centradas casi exclusivamente en extinción pueden contribuir indirectamente a la acumulación de combustible, fenómeno frecuentemente descrito como “paradoja de la extinción”, aumentando la probabilidad de incendios más intensos (Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C), 2023).

La relación entre densificación y sanidad forestal también está bien documentada. En condiciones de fuerte competencia, el debilitamiento fisiológico incrementa la susceptibilidad frente a agentes bióticos, incluidos perforadores como *Tomicus destruens*, y favorece procesos de mortalidad tras eventos de sequía (Manrique-Alba et al., 2020; Sangüesa-Barreda et al., 2015). También se ha señalado que las masas más homogéneas y estructuralmente simples pueden presentar mayor vulnerabilidad frente a determinados defoliadores, como la procesionaria, lo que refuerza el interés de promover estructuras más diversas (Azcárate et al., 2023).

En paralelo, la gestión selvícola influye directamente sobre la provisión de servicios ecosistémicos. En estos sistemas, el balance realmente relevante para la adaptación no debe evaluarse solo en términos de carbono acumulado, sino integrando carbono, reducción de la severidad de perturbaciones y mantenimiento de funciones hidrológicas y de protección del suelo, especialmente en contextos donde un gran incendio puede revertir en pocas horas décadas de acumulación de biomasa y de capital edáfico (Ruiz-Peinado et al., 2017).

Por tanto, la silvicultura no debe entenderse únicamente como una herramienta de aprovechamiento, sino como una estrategia de adaptación ecosistémica. Su función principal es modificar aquellos rasgos del rodal que condicionan la persistencia del bosque en un contexto de aridificación creciente, acumulación de combustible y aumento de perturbaciones (Díaz-Montero et al., 2024; Manrique-Alba et al., 2020; Seneviratne et al., 2021).

7

2.3.Marco regional de referencia: Región de Murcia

La Región de Murcia constituye un caso especialmente representativo de esta problemática. La estructura de sus montes encaja plenamente en el modelo mediterráneo semiárido: según el Anuario de Estadística Forestal 2017, la superficie arbolada regional está claramente dominada por coníferas, con aproximadamente 284.873 ha frente a 10.982 ha de frondosas, y una superficie arbolada total cercana a 308.053 ha (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación & Secretaría General Técnica, 2019). En ese mismo anuario, la superficie forestal protegida se sitúa en torno a 219.751 ha, lo que representa aproximadamente el 43 % de la superficie forestal regional al considerar Red Natura 2000, espacios protegidos y otras figuras (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación & Secretaría General Técnica, 2019). Con datos más recientes, el Avance de la Estadística Forestal 2022 reporta una superficie forestal total de unas 508.360 ha y una superficie

forestal ordenada de 176.299 ha, equivalente al 34,7 % (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024). Estas cifras reflejan al mismo tiempo la relevancia territorial del patrimonio forestal murciano y la necesidad de seguir reforzando la planificación como base de la gestión.

En este contexto regional, *Pinus halepensis* desempeña un papel claramente dominante. El Cuarto Inventario Forestal Nacional reporta para Murcia, en el ciclo correspondiente, del orden de 73,6 millones de pies mayores de esta especie, con un volumen maderable con corteza próximo a 7,33 millones de m³ y un incremento anual en torno a 204.725 m³. Aunque estos valores deben interpretarse con cautela por corresponder a un ciclo concreto de inventario, resultan muy útiles para ilustrar la magnitud del recurso y su peso estructural dentro del territorio forestal regional (IFN4, 2012). Sin embargo, este potencial no se traduce en una movilización significativa. La planificación regional y las estadísticas oficiales coinciden en diagnosticar una tasa de extracción de biomasa y de madera muy reducida; de hecho, el Avance 2022 reporta para Murcia un volumen de cortas extraordinariamente bajo, de 83 m³ con corteza (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024). Incluso considerando el carácter provisional del dato, este resulta coherente con el diagnóstico regional de baja movilización y con la idea de acumulación neta de biomasa que subyace en la presentación técnica (García Rodríguez, 2023).

La estrategia forestal regional aporta además claves muy relevantes para acotar el marco general al caso murciano. En primer lugar, identifica como problema la escasa intensidad de gestión, vinculada a la baja productividad, la limitada rentabilidad, la falta de instrumentos suficientes de ordenación y la necesidad de reforzar inventarios, digitalización y planificación para priorizar actuaciones (García Rodríguez, 2023). En segundo lugar, reconoce el peso del monte privado, que representa aproximadamente el 60 % de la superficie forestal, y la necesidad de activar instrumentos que favorezcan la gestión en ese ámbito. En tercer lugar, incorpora explícitamente la silvicultura adaptativa, la ecohidrología, la movilización de biomasa y el refuerzo de la defensa frente a incendios como ejes de actuación (García Rodríguez, 2023). Y, en cuarto lugar, parte de un diagnóstico plenamente coherente con el legado histórico de la región: masas procedentes en buena medida de repoblaciones protectoras, con estructuras homogéneas, mono-específicas, coetáneas y frecuentemente densas (Del Rio et al., 2008; González Rincón & Cabezas Cerezo, 2000).

Por ejemplo, en montes públicos de Lorca y Caravaca de la Cruz, diferentes trabajos han descrito repoblaciones de pino carrasco marcadas por la homogeneidad estructural, la elevada densidad y la escasa intensidad de los tratamientos de mejora durante largos periodos (Del Rio et al., 2008; González Rincón & Cabezas Cerezo, 2000; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación & Secretaría General Técnica, 2019). Esa herencia condiciona hoy la vulnerabilidad de buena parte de las masas frente a sequía, incendios y plagas. Así, cuando el crecimiento neto de biomasa no se acompaña de tratamientos que regulen la estructura del rodal, el resultado no es una conservación pasiva, sino una acumulación progresiva de competencia, continuidad de combustible y vulnerabilidad ecológica (Manrique-Alba et al., 2020).

A ello se suma el hecho de que Murcia representa uno de los contextos más exigentes para el mantenimiento del pino carrasco por su marcada aridez estructural. La región presenta

una elevada exposición y sensibilidad al déficit hídrico, por lo que el margen de actuación no reside en reducir el estrés climático externo, sino en aumentar la capacidad de adaptación del ecosistema mediante gestión (Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, 2021; Smithers & Dworak, 2023). Bajo esta lógica, la densidad se convierte en una de las variables más relevantes sobre las que es posible intervenir de forma directa. Regular la competencia entre pies, mejorar la estructura del rodal, disminuir la continuidad del combustible y favorecer trayectorias más estables pasan a ser objetivos prioritarios si se pretende aumentar la persistencia de las masas.

La pertinencia de este enfoque no es solo conceptual, sino también empírica. Murcia dispone de evidencias locales de decaimiento claramente asociadas a sequías extremas recientes. Se han documentado episodios graves de decaimiento en pinares de *Pinus halepensis* durante la sequía de 2014–2016, analizados mediante modelización y teledetección, lo que confirma la elevada vulnerabilidad regional de estas masas frente al estrés climático prolongado (Esteve Selma et al., 2018). Además, los documentos regionales de cambio climático incorporan proyecciones que apuntan a reducciones potencialmente muy severas del área apta o persistente para el pino carrasco en escenarios futuros. Entre las estimaciones citadas para el horizonte 2040–2070 se recoge, a modo ilustrativo, un posible descenso desde unas 241.000 ha actuales hasta unas 71.000 ha, lo que equivaldría a una reducción del 72 % (Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, 2021). Estas cifras deben presentarse, lógicamente, como proyecciones modelizadas y no como predicciones deterministas, pero resultan muy útiles para justificar por qué la silvicultura, aun sin modificar el clima, puede contribuir a elevar la capacidad de adaptación del sistema a través de cambios en estructura y composición (Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, 2021).

9

Acotar el marco general al caso de Murcia significa, por tanto, traducir la bibliografía general sobre pinares mediterráneos semiáridos a una realidad territorial concreta caracterizada por cuatro rasgos principales: prioridad de la gestión adaptativa, enfoque de paisaje con fuerte presencia de interfaz urbano-forestal, limitación operativa por presupuesto y necesidad de priorización espacial, y legado de repoblaciones densas con baja intensidad histórica de gestión (Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, 2021; García Rodríguez, 2023; González Rincón & Cabezas Cerezo, 2000; Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C), 2023; Smithers & Dworak, 2023).

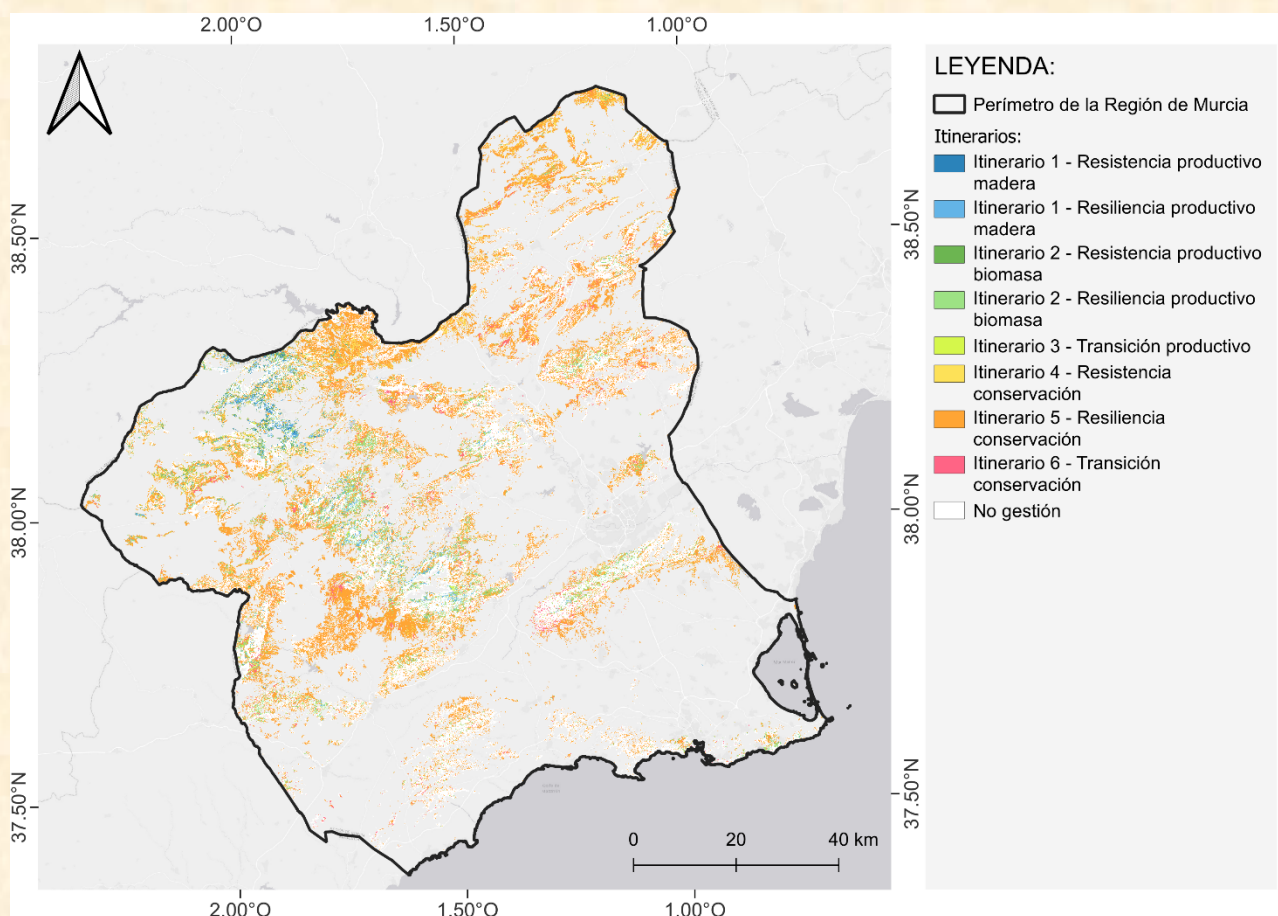
3. ENFOQUE METODOLÓGICO

Desde este planteamiento, la metodología se apoya en dos pilares fundamentales. El primero es su anclaje territorial, entendido como la adecuación de las decisiones de gestión al contexto biofísico, selvícola y funcional de cada territorio a partir de información local, datos de campo y conocimiento experto. El segundo es el uso de técnicas robustas de cuantificación, capaces de caracterizar el estado de los ecosistemas, estimar los servicios ecosistémicos que generan y evaluar cómo distintas alternativas selvícolas pueden mejorar, mantener o restaurar dichos servicios. Ambos pilares convergen en un enfoque de gestión forestal ecohidrológica, que constituye la base metodológica del trabajo.

3.1. Base territorial de aplicación y unidades de gestión

Antes de describir el enfoque metodológico, conviene precisar la base territorial sobre la que este se aplica. El presente trabajo no define nuevas unidades espaciales de análisis, sino que toma como referencia la zonificación elaborada en el entregable R1.1 del proyecto GREEN BOOST para las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia. En dicho trabajo, la superficie ocupada por la especie fue clasificada mediante la integración de la estrategia adaptativa, la orientación funcional de la masa y la viabilidad técnica de gestión, dando lugar a una tipología organizada en itinerarios de gestión.

Figura 1. Zonificación de unidades de gestión en las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia.



10

Sobre esta base territorial, el presente entregable desarrolla pautas selvícolas generales para los seis itinerarios con capacidad de intervención, agrupados según su orientación productiva o de conservación y según la estrategia adaptativa asociada a cada unidad:

- Itinerario 1: resistencia o resiliencia productivo maderable.
- Itinerario 2: resistencia o resiliencia productivo biomasa.
- Itinerario 3: transición productivo biomasa.
- Itinerario 4: resistencia conservación.
- Itinerario 5: resiliencia conservación.

- Itinerario 6 transición conservación.

Junto a ellos, el R1.1 identificó una categoría adicional de “no gestión” para aquellas superficies en las que la intervención selvícola no se considera técnicamente viable en el marco del estudio. No obstante, dado que el objetivo de este documento es definir criterios y orientaciones de intervención, el desarrollo metodológico y técnico se centra en los itinerarios gestionables.

3.2. Enfoque ecohidrológico de la gestión forestal

La ecohidrología integra hidrología y ecología y permite analizar el funcionamiento de los sistemas forestales desde la perspectiva del agua, principal factor limitante en los pinares semiáridos mediterráneos. En estos ecosistemas, el agua condiciona no solo el crecimiento y la producción primaria, sino también la competencia entre pies, la regeneración, la susceptibilidad a plagas, el riesgo de incendio y la capacidad de resistencia y recuperación frente a perturbaciones.

Este enfoque implica reinterpretar la selvicultura desde una perspectiva más amplia que la tradicional. Si en la selvicultura clásica europea el principal factor limitante era la luz y la gestión se orientaba a maximizar la producción neta de biomasa, en las regiones semiáridas el agua pasa a ocupar una posición central. En consecuencia, la eficiencia en su uso, su distribución en el sistema y la influencia de la estructura forestal sobre el balance hídrico adquieren un papel decisivo.

Desde esta óptica pueden reconocerse varias orientaciones de la gestión forestal que, aunque tradicionalmente hayan evolucionado de forma separada, comparten el agua como elemento articulador: la selvicultura de producción, la selvicultura orientada a la producción de agua, la selvicultura de protección del suelo, la selvicultura preventiva frente a incendios y la selvicultura adaptativa al cambio climático. La gestión forestal ecohidrológica integra estas orientaciones bajo un mismo marco analítico, situando el agua en el centro de la toma de decisiones.

11

3.3. Multifuncionalidad forestal y marco CAFE

Uno de los principios metodológicos del trabajo es que la gestión forestal debe responder a la pluralidad de funciones que hoy se demandan a los montes. En consecuencia, los bosques no deben analizarse únicamente desde la producción de madera o biomasa, sino como sistemas capaces de generar simultáneamente múltiples bienes y servicios. Entre ellos destacan el abastecimiento y regulación del agua, la captura y almacenamiento de carbono, la reducción del riesgo de incendio, la resiliencia frente al cambio climático, la conservación de la biodiversidad, la función paisajística y recreativa, la protección del suelo y la provisión de recursos directos como madera, resina, piña, corcho, pastos u otros productos no madereros.

Para incorporar esta multifuncionalidad a la gestión es necesario trasladarla del plano conceptual al cuantitativo. Es decir, los servicios ecosistémicos deben poder medirse, compararse y evaluarse frente a distintos escenarios de manejo, del mismo modo que históricamente se ha hecho con la producción maderera. En este contexto, el trabajo adopta el marco **CAFE**, acrónimo de Carbono, Agua, Fuego y Eco-resiliencia, que agrupa los

principales servicios ecosistémicos y objetivos de gestión en cuatro dimensiones funcionales.

La dimensión **Carbono** integra variables relacionadas con la producción de biomasa, el almacenamiento y secuestro de carbono y, en su caso, la estabilidad de dicho carbono frente a perturbaciones. La dimensión **Agua** recoge los aspectos vinculados al balance hídrico del sistema, incluyendo el agua utilizada por la vegetación, la disponibilidad hídrica efectiva, la infiltración, la humedad del suelo, la recarga y, en general, la distribución del agua en el ecosistema. La dimensión **Fuego** se refiere a la influencia de la estructura forestal y del estado del combustible sobre el riesgo y comportamiento potencial de incendio. Por último, la dimensión **Eco-resiliencia** aborda la capacidad del sistema para soportar y recuperarse frente a eventos extremos, especialmente sequías, aunque también otras perturbaciones que comprometen su persistencia.

Este marco permite analizar cómo la gestión modifica la distribución del agua en el sistema y cómo esos cambios repercuten sobre otros servicios ecosistémicos. Así, una determinada reducción de densidad puede mejorar la disponibilidad de agua para el rodal residual y aumentar su resiliencia frente a sequías; al mismo tiempo, puede reducir la continuidad del combustible y, por tanto, el riesgo de incendio, o afectar al balance de carbono según la intensidad de la intervención y el horizonte temporal considerado. El valor del enfoque CAFE reside precisamente en permitir la evaluación conjunta de estas sinergias y compromisos.

3.4. Técnicas robustas de cuantificación y simulación

12

El segundo gran bloque metodológico se centra en la aplicación de técnicas robustas de cuantificación de servicios ecosistémicos y simulación de escenarios selvícolas. El objetivo no es únicamente estimar el estado actual del sistema, sino explorar cómo distintas intervenciones pueden modificar sus procesos internos y, con ello, la provisión de servicios ecosistémicos.

Para ello se recurre a modelos de procesos o *process-based models* (PBM), también denominados modelos mecanísticos o ecosistémicos, que representan matemáticamente el funcionamiento de sistemas biológicos bien definidos y permiten simular flujos de agua, carbono, nitrógeno y energía, así como su evolución temporal. Estos modelos pueden ser distribuidos o no distribuidos. Los modelos distribuidos diferencian espacialmente los procesos en función de la heterogeneidad del terreno, la vegetación y el contexto hidrológico, mientras que los no distribuidos trabajan a escala de parcela, rodal o región homogénea, representando el sistema mediante valores medios o agregados.

En el marco metodológico adoptado, ambos enfoques son válidos y complementarios. En este trabajo, la modelización se realiza con Biome-BGC MuSo (Hidy et al., 2026), un PBM no distribuido, y se emplea para construir y comparar una situación de referencia y distintos escenarios de gestión forestal. La simulación de estos escenarios permite cuantificar la respuesta del sistema en términos de agua, carbono, fuego y eco-resiliencia y, por tanto, estimar la adicionalidad o mejora generada por la gestión respecto a la situación inicial.

3.5. Apoyo a la decisión mediante la DSS CAFE

La DSS (*Decision Support System*) CAFE (*Carbon, Aqua, Fire and Eco-resilience*) es una herramienta de apoyo a la decisión multiobjetivo para la gestión forestal. Permite cuantificar y optimizar múltiples servicios ecosistémicos derivados de la gestión forestal (Pérez-Romero et al., 2025) a través de la integración de tres bloques funcionales: simulación, optimización y visualización. El bloque de simulación cuantifica la respuesta del sistema ante diferentes alternativas selvícolas a partir de modelos ecohidrológicos, como Biome-BGC MuSo, y otros procedimientos de cálculo. Sobre esta base, el bloque de optimización utiliza algoritmos genéticos evolutivos multiobjetivo, es decir, evalúa distintas combinaciones de tratamiento para identificar aquellas que ofrecen el mejor equilibrio entre varios objetivos que pueden entrar en conflicto entre sí. Finalmente, el bloque de visualización permite interpretar de forma iterativa los resultados mediante una interfaz orientada al usuario, facilitando la selección de las soluciones más adecuadas según las prioridades de gestión.

De este modo, la DSS CAFE nos permite diseñar y planificar actuaciones selvícolas abordando dos cuestiones fundamentales de la gestión: cuánto intervenir y cuándo intervenir (Pérez-Romero et al., 2025). Asimismo, la herramienta permite definir qué servicios ecosistémicos u objetivos se desean optimizar, mientras que el resto pueden mantenerse como variables de seguimiento.

En coherencia con este planteamiento, la aplicación de la DSS CAFE en el presente trabajo se orientó a una priorización diferenciada según el tipo de itinerario de gestión. Así, los itinerarios de orientación productiva se configuraron dando mayor peso a variables relacionadas con el almacenamiento y la extracción de biomasa, junto con métricas de respuesta a sequía, mientras que los itinerarios de orientación protectora o de conservación se centraron en variables asociadas a la respuesta frente a sequía, el riesgo de ignición y el funcionamiento hídrico del sistema. Esta adaptación permitió ajustar la lógica de la herramienta a la finalidad concreta de cada unidad territorial.

13

4. CONFIGURACIÓN, CALIBRACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO BIOME-BGC MUSO

4.1. Variables de entrada

Para la configuración de Biome-BGC MuSo (véase el apartado 3.4) fue necesario integrar información de tipo (i) **dasométrico**, (ii) **meteorológico**, (iii) **edáfico**, (iv) **topográfico** y (v) **ecofisiológico**.

Estas categorías de variables de entrada fueron comunes tanto en la fase de calibración como en la de simulación, aunque su construcción no fue idéntica en ambos casos. Durante la calibración, los inputs se definieron a partir de **parcelas reales**, de modo que representaban condiciones observadas de sitio. Por el contrario, en la simulación de itinerarios se utilizaron **valores agregados y representativos** para cada clase de gestión

forestal sostenible (GFS), con objeto de generar **situaciones tipo homogéneas y comparables**.

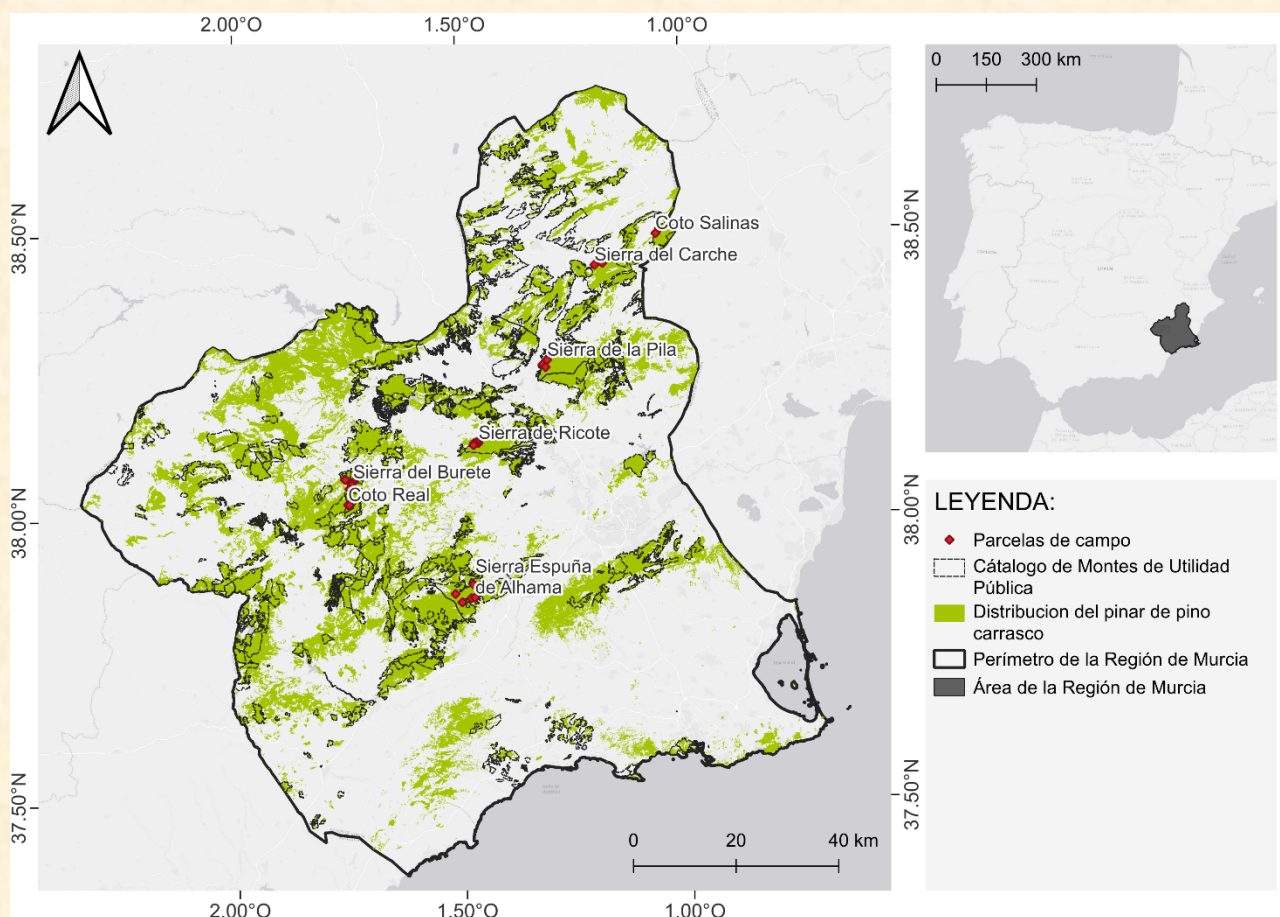
Esta distinción metodológica resulta clave para la interpretación de los resultados, puesto que la calibración reproduce condiciones reales de parcela, mientras que la simulación se plantea sobre escenarios teóricos contruados para representar cada itinerario de gestión.

4.1.1. Datos dasométricos

Sobre la distribución de los pinares de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia previamente delimitada en el entregable R1.1 del proyecto GREEN BOOST, se diseñó un muestreo de campo orientado a obtener **datos observados utilizados para la caracterización y validación** del estudio.

Se establecieron **25 parcelas circulares** (véase Figura 2) de 15 m de radio ($\approx 0,07$ ha), distribuidas en los montes de Coto Real (2), Sierra de Ricote (4), Sierra Espuña de Alhama (5), Sierra del Burete (4), Sierra de la Pila (3), Sierra del Carche (3), Coto Salinas (2) y parcelas privadas en el término municipal de Cehegín (2).

Figura 2. Distribución de *Pinus halepensis* y localización de las parcelas de campo en la Región de Murcia.



En estas parcelas se obtuvieron, entre otras, variables dasométricas como la **densidad** (pies/ha), la **edad**, el **crecimiento anual desde el año 2005** ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$) y el **volumen con corteza** (VCC, m^3/ha). Esta información se utilizó como base para la caracterización de las

masas y, por tanto, para la construcción de los casos reales empleados en la calibración del modelo.

4.1.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos utilizados en este trabajo proceden del producto **CORDEX regional climate model data on single levels** (Copernicus Climate Change Service, 2019). Se empleó el dominio europeo EUR-11, con resolución espacial de $0,11^\circ \times 0,11^\circ$ y resolución temporal diaria, utilizando la combinación formada por el modelo climático global IPSL-IPSL-CM5A-MR y el modelo climático regional IPSL-WRF381P, bajo el miembro de conjunto r1i1p1, tanto para el experimento histórico como para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, con datos disponibles desde 1951 hasta 2100.

A partir de esta base se obtuvieron las variables meteorológicas necesarias para la construcción de los archivos de entrada de Biome-BGC MuSo:

- **temperatura máxima diaria del aire,**
- **temperatura mínima diaria del aire,**
- **precipitación,**
- **radiación solar descendente en superficie y**
- **humedad relativa del aire a dos metros.**

A partir de ellas se calcularon, además, las variables derivadas requeridas por el modelo, incluyendo (i) la temperatura media diurna, (ii) el déficit de presión de vapor y (iii) la duración del día. La temperatura media diurna se estimó siguiendo la formulación estándar de Biome-BGC/MT-CLIM, a partir de la temperatura máxima y mínima diarias, como aproximación de la temperatura media efectiva del periodo de luz utilizada por el modelo en la simulación de procesos fisiológicos. La duración del día se calculó de forma astronómica a partir de la latitud y del día juliano, mientras que el déficit de presión de vapor se obtuvo a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa, como diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión real de vapor.

Durante la fase de calibración, las series meteorológicas se asignaron a cada parcela a partir del píxel CORDEX correspondiente a su localización. En cambio, en la fase de simulación de los itinerarios se construyeron series climáticas representativas para cada caso tipo, mediante la agregación espacial de la información meteorológica sobre la superficie total clasificada en cada tipología de gestión. De este modo, mientras la calibración se apoyó en condiciones climáticas asociadas a parcelas reales, la simulación se basó en series representativas obtenidas a partir de la media espacial de los píxeles CORDEX correspondientes a cada tipología de gestión.

4.1.3. Datos edáficos

La caracterización edáfica del estudio se apoyó en dos fuentes complementarias de información: los análisis realizados sobre las parcelas muestreadas en campo y la información adicional procedente de la base de datos CARBOSOL Database of Spain.

4.1.3.1. Parcelas muestradas

Entre junio y julio de 2025 se muestrearon 25 parcelas circulares de 15 m de radio (véase apartado 4.1.1). De acuerdo con los protocolos habituales de muestreo en zonas forestales, en cada parcela se establecieron tres puntos de muestreo, sumando un total de 77 puntos.

En cada punto se retiró el horizonte orgánico y se procedió a la toma de muestras de suelo en los 30 cm superficiales, separando la capa de 0–15 cm y la de 15–30 cm. Se utilizaron barrenas tipo Kopecky, con el objetivo de conocer el volumen de suelo muestreado y obtener así la densidad aparente. Las muestras se transportaron al laboratorio, donde se secaron al aire, se disgregaron y se tamizaron a través de una malla de 2 mm.

En la fracción fina (< 2 mm) se realizaron las siguientes determinaciones fisicoquímicas:

- pH;
- textura;
- carbono orgánico;
- densidad aparente;
- factor de humedad del suelo seco al aire.

El pH se determinó en un extracto acuoso 1:2,5 mediante pH-metro. La textura se estimó por densitometría, mediante el método de Bouyoucos (MAPA, 1982), obteniendo los porcentajes de arena, limo y arcilla. El carbono orgánico del suelo se determinó el contenido de carbono orgánico por oxidación húmeda con dicromato potásico 1N en medio ácido, valorando el exceso de dicromato con sulfato ferroso amónico 0,5N, según el método de Walkley y Black (Walkley & Black, 1934).

16

4.1.3.2. Fuentes complementarias de información edáfica

Como complemento a la información edáfica obtenida en las parcelas muestradas, se utilizó la **CARBOSOL Database of Spain**, una base de datos georreferenciada de perfiles de suelo de ámbito nacional publicada en PANGAEA (Llorente et al., 2018). Esta base de datos permitió reforzar la caracterización edáfica de los itinerarios mediante la incorporación de información adicional procedente de perfiles localizados en la Región de Murcia.

En total, se dispuso de 25 puntos procedentes de la base CARBOSOL, una vez excluidos aquellos cuya clasificación dentro de los itinerarios correspondía a la categoría no gestión. Junto con las 25 parcelas de campo muestradas, ello constituyó una base conjunta de 50 parcelas de información edáfica, aumentando así la representatividad espacial de la caracterización del suelo.

A partir de esta base integrada se obtuvieron las variables edáficas de interés para la parametrización del modelo, en particular **textura** (arena, limo y arcilla), **pH**, relación **C/N**, **densidad aparente** y **profundidad del suelo**. Durante la fase de calibración se emplearon los datos específicos de cada parcela. En cambio, en la fase de simulación se utilizaron valores medios por itinerario de gestión, calculados a partir de la integración de ambas fuentes de información.

Tabla 1. Valores medios de las variables edáficas por itinerario de gestión forestal sostenible (GFS).

Itinerario	pH	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Relación C/N	Densidad aparente (g/cm ³)	Profundidad del suelo (m)
1	8,283	34,823	38,191	26,986	11,250	1,264	1,015
2	8,257	33,140	40,746	26,113	10,447	1,074	0,649
3	8,467	11,700	39,833	48,467	10,447	1,074	0,569
4	8,275	45,525	34,025	20,450	11,700	1,391	0,915
5	8,001	42,976	37,295	19,735	10,580	1,300	0,632
6	8,001	47,223	43,194	9,583	10,580	1,248	0,370

4.1.4. Variables topográficas

Para la obtención de la **latitud** y la **elevación** de los puntos de simulación se utilizó el **Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 2 metros (MDT02) de España**, generado por el **Instituto Geográfico Nacional (IGN)** a partir de las nubes de puntos LiDAR de la segunda cobertura. Se trata de un modelo ráster de elevaciones con resolución espacial de **2 m**, distribuido por el **Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)**. A partir de esta fuente se obtuvo la información topográfica necesaria para apoyar la parametrización de los casos de estudio y la construcción de los archivos de entrada del modelo.

17

4.1.5. Parametrización ecofisiológica de la especie

La configuración de Biome-BGC MuSo incluyó la definición de los parámetros ecofisiológicos de *Pinus halepensis* mediante el archivo específico de la especie. Este archivo recoge los valores que describen el funcionamiento biológico del sistema, incluyendo aspectos relacionados con el crecimiento, la asignación de biomasa, las relaciones entre carbono y nitrógeno, la respiración, la regulación estomática y la respuesta frente al estrés y la senescencia.

Como base inicial se empleó una parametrización previa de pino carrasco desarrollada para condiciones mediterráneas de la provincia de Valencia (Pérez-Romero et al., 2026, en preparación). A partir de esa configuración de partida, se realizó un ajuste específico para el caso de Murcia mediante un módulo de autocalibración integrado en la propia DSS CAFE (Pérez-Romero et al., 2026, en preparación), con el fin de adaptar la respuesta del modelo a las condiciones del área de estudio. En el apartado 4.4.3 se detallan los parámetros calibrados, los valores adoptados y los resultados del ajuste obtenido.

4.2. Construcción de los inputs para calibración con parcelas reales

La calibración del modelo se realizó a partir de dos parcelas seleccionadas entre las 25 parcelas muestreadas, atendiendo a criterios de disponibilidad temporal de las series meteorológicas necesarias para la construcción de los archivos de entrada y al conocimiento de su historial de gestión. Estas dos parcelas fueron las únicas para las que se disponía de evidencia de ausencia de intervenciones selvícolas, condición necesaria para reproducir con mayor fiabilidad su dinámica mediante modelización. Ambas se localizan en la Sierra del Burete y corresponden a los casos MP36-05 y MP36-06. En esta nomenclatura, MP hace referencia a monte privado; el número 36 indica su proximidad al MUP 36; y los códigos 05 y 06 corresponden al identificador específico de cada parcela.

Para cada una de ellas se construyó un caso de simulación específico, utilizando información puntual de parcela, sin agregación espacial. Los principales valores de partida fueron los siguientes:

Tabla 2. Variables de entrada utilizadas en los casos de calibración MP36-05 y MP36-06.

Grupo de variables	Variable	Unidad	MP36-05	MP36-06
Datos dasométricos	Carbono por planta	gC/planta	0,87824	0,87824
	Densidad	pies/ha	1.485	1.217
	vegC inicial del primer año	kgC/m ²	0,0001304	0,0001069
	Edad	años	55	49
Datos de sitio	Elevación	m	582	582
	Latitud	°	38,071	38,071
	Temperatura media anual	°C	12,32	12,32
	Rango térmico anual	°C	39,20	39,20
Datos edáficos (media de todas las capas del suelo)	Profundidad del suelo	m	0,90	0,48
	Arena	%	47,58	42,71
	Limo	%	27,35	33,08
	Arcilla	%	25,07	24,21
	Densidad aparente	g/cm ³	1,46	1,25
	pH	—	7,12	7,10

La secuencia temporal empleada para cada caso se construyó en coherencia con la edad real del rodal. En la parcela MP36-05 se definieron 57 años de simulación, con inicio en 1969, mientras que en la parcela MP36-06 se definieron 51 años de simulación, con inicio en 1975. En ambos casos, estas secuencias se utilizaron para la fase de desarrollo transitorio del sistema y para la simulación normal posterior (véase apartado 4.4.1) empleada en el contraste con las observaciones.

La fase de calibración, por tanto, se apoyó en inputs específicos de parcela con el fin de contrastar el comportamiento del modelo frente a condiciones reales de sitio antes de su aplicación a los casos virtuales asociados a los itinerarios de gestión.

4.3. Construcción de los inputs para simulación

Una vez calibrado el modelo con parcelas reales, su aplicación en este trabajo no se realizó sobre rodales concretos individualizados, sino sobre seis situaciones tipo definidas para representar configuraciones medias asociadas a las distintas clases de gestión forestal sostenible (GFS) derivadas de la zonificación previa del R1.1.

Para cada uno de estos seis casos se definió un conjunto específico de variables de sitio, integrado por altitud, latitud, temperatura media anual y rango térmico anual y valores de suelo:

Tabla 3. Variables de entrada utilizadas en los casos de los itinerarios.

19

Grupo de variables	Variable	Unidad	1	2	3	4	5	6
Datos de sitio	Elevación	m	842,84	773,86	740,32	698,75	618,96	610,13
	Latitud	°	38,124	38,070	37,955	38,245	38,100	38,061
	Temperatura media anual	°C	13,097	13,809	14,24	13,93	14,46	14,62
	Rango térmico anual	°C	33,34	33,10	32,642	33,316	32,55	32,858
Datos edáficos (media de todas las capas del suelo)	Profundidad del suelo	m	8,283	8,257	8,467	8,275	8,001	8,001
	Arena	%	34,823	33,140	11,700	45,525	42,976	47,223
	Limo	%	38,191	40,746	39,833	34,025	37,295	43,194
	Arcilla	%	26,986	26,113	48,467	20,450	19,735	9,583
	Densidad aparente	g/cm ³	1,264	1,074	1,074	1,300	1,391	1,248
	pH	—	8,283	8,257	8,467	8,275	8,001	8,001

Grupo de variables	Variable	Unidad	1	2	3	4	5	6
	Relación C/N	—	11,25	10,447	10,447	11,70	10,58	10,58

Adicionalmente, se incorporaron a los archivos de suelo las propiedades hídricas necesarias para la simulación ecohidrológica, incluyendo el contenido de agua a saturación, la capacidad de campo, el punto de marchitez y el contenido higroscópico. En la parametrización empleada, estos valores fueron:

- saturación = 0,28;
- capacidad de campo = 0,24;
- punto de marchitez = 0,14;
- contenido higroscópico = 0,02.

En cuanto a la componente climática, las simulaciones se construyeron a partir de series meteorológicas extraídas de CORDEX, generadas mediante la combinación del periodo histórico y el escenario RCP 8.5, con agregación espacial sobre el conjunto de la superficie clasificada en cada tipología de itinerario.

De este modo, las simulaciones de itinerario se construyeron a partir de valores agregados y representativos por clase GFS, de manera que cada caso constituye una situación tipo coherente con la estrategia adaptativa, la orientación funcional y la viabilidad de gestión del itinerario correspondiente. Esta simplificación metodológica permitió comparar de forma consistente alternativas selvícolas bajo condiciones medias representativas de cada clase territorial.

20

4.4. Calibración y validación del modelo

4.4.1. Procedimiento general de calibración

La calibración del modelo se realizó utilizando dos casos reales de parcela (véase apartado 4.2), contruidos a partir de información específica de sitio, con el objetivo de comprobar la capacidad de Biome-BGC MuSo para reproducir la dinámica de funcionamiento y crecimiento de masas de *Pinus halepensis* en condiciones reales.

Los resultados simulados se contrastaron frente al carbono almacenado en la biomasa vegetal (*vegC* en Biome-BGC MuSo) utilizado como indicador de la respuesta estructural del rodal. La calibración se orientó prioritariamente a mejorar la simulación de esta variable, por ser la más directamente vinculada a la información de crecimiento y estructura obtenida en campo y, por tanto, la más relevante y fiable para el ajuste del comportamiento general del modelo.

La ejecución temporal de cada caso de calibración no se realizó directamente a partir de los datos observados de la parcela, sino mediante una secuencia de simulación diseñada para generar unas condiciones iniciales internamente coherentes antes de comparar el modelo con las observaciones. Esta decisión metodológica fue necesaria porque, en modelos basados en procesos como Biome-BGC MuSo, el comportamiento del sistema no

depende únicamente de las variables climáticas o estructurales introducidas, sino también del estado previo de los reservorios internos de carbono, nitrógeno y agua. Si la simulación comenzara desde valores arbitrarios o poco realistas, parte de la respuesta del modelo vendría condicionada por ese arranque artificial y no por las condiciones reales del sitio.

Por esta razón, la simulación de cada caso de calibración siguió la siguiente secuencia:

- **Construcción de una serie climática continua** mediante la combinación del periodo **histórico** (1951-2005) y el escenario **RCP 4.5** (2006-2025). Esta serie no se utilizó para interpretar directamente la evolución futura de la parcela, sino para disponer de una secuencia climática suficientemente larga y continua que permitiera ejecutar correctamente las distintas fases del modelo.
- **Ejecución de un *spin-up***. El *spin-up* es una fase de inicialización del modelo cuyo objetivo es estabilizar progresivamente sus principales reservorios y flujos internos. En esta etapa, el modelo se hace funcionar durante un periodo prolongado para que variables como el carbono almacenado en la vegetación y el suelo, el nitrógeno o el agua del sistema alcancen valores compatibles entre sí y con las condiciones ambientales del caso de estudio. En otras palabras, el *spin-up* sirve para evitar que la simulación empiece desde un estado artificial o desequilibrado.
- **Ejecución de un *transient* con una duración equivalente a la edad real del rodal**. Una vez alcanzado el equilibrio inicial, se ejecutó una fase transitoria o *transient*. A diferencia del *spin-up*, cuyo objetivo es estabilizar el sistema, el *transient* permite hacer evolucionar el modelo bajo una secuencia climática concreta durante un periodo determinado. En Biome-BGC MuSo, esta fase resulta especialmente útil para evitar cambios bruscos entre las condiciones del *spin-up* y las de la simulación normal, especialmente en variables de forzamiento relevantes para el crecimiento, como la concentración atmosférica de CO₂ o la deposición de nitrógeno. En este trabajo, el *transient* se utilizó además para hacer evolucionar el sistema durante un número de años equivalente a la edad real del rodal, de modo que el estado resultante reflejara una trayectoria temporal compatible con el desarrollo de la masa antes de iniciar la simulación de contraste con observaciones.
- **Aplicación de una corta final**. Al término del *transient* se aplicó una corta final, no como representación literal de una intervención realmente ejecutada en la parcela, sino como un recurso metodológico para reiniciar la estructura aérea de la masa manteniendo, al mismo tiempo, el estado interno del sistema ya ajustado por las fases anteriores.
- **Ejecución de la simulación normal (*normal run*)** partiendo de 0 y con la edad real del rodal. A partir de ese punto se ejecutó la simulación principal de contraste con las observaciones, partiendo desde edad cero tras la corta y simulando de nuevo la edad real del rodal. Esta fase es la que se utilizó para comparar los valores simulados con los datos observados en campo.

21

Esta secuencia metodológica se adoptó por cuatro razones principales:

- evitar condiciones iniciales arbitrarias;
- estabilizar los principales reservorios y flujos internos del modelo;
- generar un estado ecofisiológicamente coherente con el sitio y con la trayectoria climática simulada;
- comparar el crecimiento observado desde una base homogénea entre parcelas.

En consecuencia, la secuencia **serie climática continua – spin-up – transient – corta final – normal run** permitió que la calibración no dependiera de un arranque artificial del modelo, sino de una representación más consistente del funcionamiento interno del sistema antes del contraste con las observaciones.

4.4.2. Herramienta de calibración y ajuste de parámetros

El ajuste de parámetros (véase el apartado 4.1.5) se realizó mediante un módulo de autocalibración integrado en la propia DSS CAFE, diseñado para explorar de forma automática combinaciones alternativas de parámetros ecofisiológicos del archivo de especie y evaluar su capacidad para reproducir el comportamiento observado en los casos reales de calibración.

La lógica de la calibración combinó tres componentes principales:

- la ejecución iterativa del modelo Biome-BGC MuSo para cada caso de calibración;
- la modificación automática de los parámetros seleccionados dentro de rangos predefinidos;
- la evaluación del ajuste entre valores simulados y observados mediante estadísticos de bondad de ajuste.

22

Sobre esta base, la búsqueda de soluciones se formuló como un problema de optimización multiobjetivo, resuelto mediante un algoritmo evolutivo, lo que permitió identificar combinaciones de parámetros no dominadas y seleccionar aquellas con comportamiento más consistente en el conjunto de parcelas consideradas.

En cada iteración, la herramienta modificó los parámetros ecofisiológicos seleccionados, ejecutó el modelo para las dos parcelas de calibración y calculó las métricas de ajuste para las variables de contraste. Dado que en este trabajo la calibración se orientó prioritariamente a reproducir el carbono almacenado en la biomasa vegetal (vegC), la optimización se centró especialmente en mejorar el comportamiento del modelo para esta variable, utilizando una agregación basada en el valor medio de los resultados obtenidos en ambos casos. De este modo, no se buscó ajustar el modelo a una única parcela concreta, sino obtener una parametrización con capacidad de respuesta coherente en condiciones reales dentro del área de estudio.

La calibración (véase apartado 4.4.2) se centró en aquellos parámetros con mayor influencia sobre la simulación del carbono acumulado en la biomasa vegetal (vegC en Biome-BGC MuSo). La Tabla 4 recoge los parámetros calibrados, indicando la

denominación utilizada en Biome-BGC MuSo, la unidad empleada en el archivo ecofisiológico y el valor finalmente implementado.

Tabla 4. Parámetros ecofisiológicos calibrados e incorporados al archivo ecofisiológico de *Pinus halepensis*

Nombre del parámetro en Biome-BGC MuSo	Unidad	Valor final	
base temperature	°C	7,93	
optimal1 temperature for growth displayed on current day	°C	22,24	
C:N of leaves	kgC/kgN	48,05	
dry matter carbon content of leaf litter	kgC/kgDM	0,4570	
ratio of shaded SLA:sunlit SLA	DIM	1,5603	
fraction of leaf N in Rubisco	DIM	0,2893	
fraction of leaf N in PEP Carboxylase	DIM	0,0441	
maximum stomatal conductance (projected area basis)	m/s	0,0385	
cuticular conductance (projected area basis)	m/s	0,0198	23
boundary layer conductance (projected area basis)	m/s	0,2069	
growth resp per unit of C grown	prop.	0,5737	
maintenance respiration in kgC/day per kg of tissue N	kgC/kgN/d	0,1363	
symbiotic+asymbiotic fixation of N	kgN/m ² /yr	0,0410	
maximum senescence mortality coefficient of aboveground plant material	prop.	0,00358	
lower limit extreme high temperature effect on senescence mortality	°C	40,00	

4.4.3.Evaluación de ajuste del modelo

En este trabajo, la calibración y validación se realizaron sobre **dos parcelas** seleccionadas por la disponibilidad de los datos de entrada necesarios para la simulación y por el conocimiento de su historial de gestión. El ajuste del modelo se evaluó mediante la comparación entre valores simulados y observados para el **carbono almacenado en la biomasa vegetal**, empleado como indicador de la respuesta estructural del rodal y derivado de la información dendrométrica disponible. De este modo, la validación permitió comprobar

la capacidad del modelo para representar la acumulación de biomasa en las masas estudiadas.

Para evaluar la capacidad general del modelo y la precisión de su ajuste frente a los datos observados, se utilizaron tres estadísticos ampliamente empleados en este tipo de estudios: **(1) el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)**, que compara la varianza residual de la simulación con la varianza de los datos observados (ecuación 1); **(2) el porcentaje de sesgo (PBIAS)**, que mide la tendencia media del modelo a sobreestimar o infraestimar la serie observada (ecuación 2); y **(3) la raíz del error cuadrático medio (RMSE)**, que cuantifica la magnitud media de las diferencias entre valores simulados y observados (ecuación 3).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right] \quad (\text{ecuación 1})$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs})} \right] \quad (\text{ecuación 2})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}{N}} \quad (\text{ecuación 3})$$

donde N es el número de registros, Y^{obs} es el valor observado para cada año, Y^{sim} es el valor simulado para cada año, and Y^{mean} es el valor medio observado.

Estas métricas se calcularon para el carbono almacenado en la biomasa vegetal, tanto a nivel individual por parcela como de forma agregada para el conjunto de casos de calibración.

La parametrización presentada en la Tabla 4 fue la que ofreció el comportamiento más consistente en el ajuste conjunto de los casos de calibración, con un valor agregado de **NSE = 0,790**, **PBIAS = 0,288** y **RMSE = 0,582**. A escala individual, los valores de NSE fueron **0,757** para la parcela MP36-05 y **0,823** para la parcela MP36-06, lo que confirmó una capacidad satisfactoria del modelo para reproducir la dinámica observada de carbono en biomasa vegetal en ambas condiciones de sitio.

Tabla 5. Resultados de ajuste de la solución ecofisiológica seleccionada para el carbono acumulado en biomasa vegetal (vegC) en las parcelas de calibración.

Parcela	VegC NSE	VegC PBIAS	VegC RMSE
MP36-05	0.757	5.281	0.718
MP36-06	0.823	-4.706	0.446
Promedio	0.79	0.288	0.582

La validación obtenida a partir de este conjunto de estadísticos constituyó la base para la posterior aplicación del modelo a los casos teóricos.

5. EVALUACIÓN MULTIOBJETIVO MEDIANTE LA DSS CAFE

Una vez calibrado y validado el modelo Biome-BGC MuSo a partir de los casos reales observados, la evaluación de alternativas selvícolas se abordó mediante la DSS CAFE.

La aplicación de la DSS CAFE se realizó sobre los seis casos tipo definidos previamente para representar configuraciones medias asociadas a los itinerarios de gestión forestal sostenible establecidos en el entregable R1.1. De este modo, la herramienta no se utilizó para simular rodales concretos individualizados, sino para explorar alternativas de intervención sobre situaciones representativas de cada itinerario, manteniendo coherencia con el enfoque territorial adoptado en el conjunto del trabajo.

Desde esta perspectiva, la DSS CAFE permitió pasar de la simulación ecohidrológica del funcionamiento de la masa a la comparación prospectiva de alternativas de gestión, integrando simultáneamente objetivos relacionados con carbono, agua, fuego y eco-resiliencia. La utilidad de esta aproximación radica en que no se limita a describir el comportamiento actual del sistema, sino que permite identificar combinaciones de tratamiento potencialmente más adecuadas según la orientación funcional de cada itinerario y según los compromisos existentes entre distintos servicios ecosistémicos.

5.1. Construcción de los casos de simulación para la DSS CAFÉ

25

La evaluación multiobjetivo mediante la DSS CAFE se construyó a partir de los seis casos tipo descritos en el apartado 4.3. Para cada uno de ellos se generó una secuencia de simulación común, orientada a obtener estados de partida comparables antes de la optimización.

Con el fin de obtener estados de partida comparables entre itinerarios, para cada caso se siguieron cuatro fases consecutivas:

- **Fase 1. *Spin-up*.** Su objetivo fue estabilizar los principales reservorios y flujos internos del sistema, generando unas condiciones iniciales ecofisiológicamente coherentes.
- **Fase 2. Simulación transitoria previa.** Tras el *spin-up*, se ejecutó una simulación de 80 años iniciada en 1951, forzada con una serie climática continua construida a partir de la combinación del periodo histórico y el escenario RCP 4.5. Al término de esta fase se aplicó una corta final, con el fin de reiniciar la estructura aérea de la masa manteniendo el estado interno previamente ajustado por la trayectoria climática y funcional del sistema. Esta fase no se planteó para reproducir la historia exacta de un rodal real, sino para generar una base homogénea de partida para todos los itinerarios.
- **Fase 3. Simulación normal previa.** A partir del estado final de la simulación transitorio, se ejecutó una simulación normal de 25 años, iniciada en 2001 y finalizada en 2025 forzada con la combinación del periodo histórico y el escenario RCP 8.5,

con el fin de generar una situación de referencia previa a la optimización similar a la situación actual de una masa joven de 25 años.

- **Fase 4. Simulación en DSS CAFE.** Finalmente, la evaluación multiobjetivo se realizó a partir del estado de reinicio generado en la fase anterior, mediante una simulación de 40 años iniciada en 2026, también bajo la serie climática histórica–RCP 8.5.

En consecuencia, la DSS CAFE no evaluó tratamientos sobre una masa recién inicializada, sino sobre un sistema previamente estabilizado y desarrollado, con una estructura inicial equivalente a la de un rodal joven ya establecido. Esta secuencia redujo la dependencia del modelo respecto a condiciones iniciales arbitrarias y permitió que la comparación entre alternativas selvícolas se realizara sobre bases metodológicas homogéneas.

En todos los casos de itinerario se mantuvo la misma parametrización ecofisiológica de la especie derivada de la calibración previa (Tabla 4), de modo que las diferencias entre simulaciones respondieron a las condiciones de sitio, clima, suelo y manejo, y no a cambios en el comportamiento fisiológico base atribuido a la especie.

5.2. Objetivos priorizados y parámetros de gestión

La configuración de la DSS CAFE se definió diferenciando entre itinerarios de orientación **productiva** e itinerarios de orientación **protectora o de conservación**. Esta distinción permitió adaptar tanto la priorización de los servicios ecosistémicos como los parámetros de gestión simulados a la lógica funcional propia de cada grupo de unidades.

26

En los itinerarios productivos, la optimización se orientó principalmente hacia variables relacionadas con el mantenimiento del capital biomásico, la movilización de producto y la respuesta de la masa frente a la sequía, incorporando además indicadores complementarios vinculados al estrés hídrico y al riesgo de ignición. En cambio, en los itinerarios protectores o de conservación, la priorización se centró en variables asociadas a la estabilidad del sistema frente a perturbaciones, la regulación hídrica y la reducción del riesgo de incendio.

De forma específica, los objetivos priorizados para cada itinerario fueron los siguientes:

- **Itinerario 1:** almacenamiento de biomasa, madera extraída, resiliencia a sequía y el riesgo de ignición.
- **Itinerario 2:** almacenamiento de biomasa, madera extraída, resiliencia a sequía y el riesgo de ignición.
- **Itinerario 3:** almacenamiento de biomasa, madera extraída, resiliencia a sequía y el riesgo de ignición.
- **Itinerario 4:** resistencia a sequía, riesgo de ignición e infiltración.
- **Itinerario 5:** resiliencia a sequía, riesgo de ignición e infiltración.
- **Itinerario 6:** resiliencia a sequía, riesgo de ignición e infiltración.

En los itinerarios 1, 2 y 3, de orientación productiva, se aplicaron los siguientes parámetros de gestión:

- ventana de tratamientos: 25–65 años, es decir, desde 2026-2066;
- número máximo de intervenciones: 3;
- intensidad por intervención: 30–50 %;
- distancia mínima entre intervenciones: superior a 10 años.

En los itinerarios 4, 5 y 6, de orientación protectora o de conservación, se aplicaron los siguientes parámetros:

- ventana de tratamientos: 25–65 años, es decir, desde 2026-2066;
- número máximo de intervenciones: 3;
- intensidad por intervención: 20–40 %;
- distancia mínima entre intervenciones: superior a 15 años.

La selección de la ventana de optimización entre los 25 y los 65 años responde a un criterio de representatividad de las masas objeto de estudio, ya que este intervalo concentra la mayor parte de las masas de pino carrasco presentes en el ámbito de aplicación del entregable. Desde el punto de vista operativo, esta decisión permite centrar la optimización en el tramo de desarrollo en el que la gestión resulta más pertinente y en el que se concentra una parte sustancial de las decisiones selvícolas de regulación de densidad.

27

A medida que aumenta la edad del rodal, aumenta también la probabilidad de que haya estado sometido de forma repetida a episodios de sequía, olas de calor, incendios, plagas u otras perturbaciones, cuyos efectos pueden acumularse y traducirse progresivamente en una disminución de la resiliencia y de la capacidad de respuesta de la masa frente a nuevos eventos adversos. Por ello, en los itinerarios de orientación productiva, y en un contexto caracterizado por una elevada exposición a riesgos bióticos y abióticos —cuya intensidad previsiblemente aumentará en las próximas décadas—, no se considera recomendable, con carácter orientativo, plantear turnos superiores a 80 años. Esta referencia no debe interpretarse como un umbral rígido, sino como una pauta prudente de gestión en masas donde la prolongación excesiva del turno incrementa el tiempo de exposición acumulada a perturbaciones.

No obstante, cuando las condiciones de gestión lo permitan y se disponga de medios técnicos suficientes, se considera recomendable flexibilizar, diversificar y localizar la silvicultura, reduciendo la rigidez de los turnos fijos y apoyando la toma de decisiones en un seguimiento continuo del estado de la masa. En este sentido, resulta especialmente conveniente establecer revisiones más frecuentes basadas en métodos de diagnóstico del vigor, de la carga y continuidad del combustible, de la regeneración, de la sanidad forestal, de la disponibilidad hídrica y del estado del suelo, con el fin de intervenir en el momento más adecuado y responder con mayor capacidad de adaptación a escenarios inciertos.

Sobre esta base, la DSS CAFE generó para cada itinerario conjuntos de soluciones eficientes que representan diferentes combinaciones de intensidad y secuencia temporal

de intervención. Ello permitió comparar alternativas de manejo en función de los servicios ecosistémicos priorizados y seleccionar aquellas opciones más coherentes con la finalidad de gestión de cada unidad territorial.

5.3. Síntesis de la situación de referencia y comportamiento funcional de los itinerarios

Dado que la parametrización obtenida en la fase de calibración permitió reproducir de forma satisfactoria la variable de ajuste empleada y que los resultados de validación mostraron una correspondencia adecuada entre los valores simulados y observados, se consideró que el modelo Biome-BGC MuSo presentaba un comportamiento suficientemente robusto para su aplicación en la DSS CAFE en el contexto de las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia. Sobre esta base, la herramienta pudo utilizarse para cuantificar el comportamiento funcional de los distintos casos tipo y para evaluar, posteriormente, alternativas de gestión forestal orientadas a la producción de servicios ecosistémicos bajo un enfoque multiobjetivo.

Como paso previo a la optimización, para cada itinerario se definió una situación de referencia sin gestión, entendida como escenario de control frente al cual interpretar el efecto relativo de las alternativas selvícolas. Estas situaciones de referencia permiten caracterizar el estado funcional de las masas en ausencia de intervención y constituyen, por tanto, la base para analizar cómo la gestión puede modificar el equilibrio entre servicios ecosistémicos relacionados con carbono, agua y eco-resiliencia. La Tabla 6 resume los valores obtenidos para los 6 itinerarios considerados en esta fase del análisis.

28

Tabla 6. Valores de referencia de la situación sin gestión para los itinerarios 1–4.

Métrica	Unidad	Itinerarios					
		1	2	3	4	5	6
Biomasa extraída	kgC·m ⁻²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Biomasa en pie	kgC·m ⁻²	11.61	12.28	11.44	11.60	11.54	9.71
Madera extraída	kgC·m ⁻²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Biomasa muerta en pie	kgC·m ⁻²	8.34	9.12	8.50	8.76	8.71	7.1
Infiltración	mm·año ⁻¹	348.00	309.87	306.72	286.60	287.21	317.72
Intercepción	mm·año ⁻¹	161.49	165.44	131.34	121.96	121.33	102.43
Evaporación	mm·año ⁻¹	178.73	169.31	174.55	170.09	170.81	188.22
Humedad superficial	m ³ ·m ⁻³	0.153	0.149	0.148	0.148	0.148	0.144

Métrica	Unidad	Itinerarios					
		1	2	3	4	5	6
Humedad profunda	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.147	0.144	0.142	0.144	0.144	0.143
Estrés hídrico (SWCstress)	—	315.18	325.57	334.53	325.44	324.75	314.61
Transpiración	$\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$	171.82	143.54	99.51	121.65	121.59	133.39
NEP	$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$	27.84	28.60	22.25	18.93	18.81	19.37
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	$\text{L} \cdot \text{kgC}^{-1}$	343.30	266.28	207.28	256.56	258.41	333.66
Resistencia (Rst)	—	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99
Resiliencia (Rsl)	—	-0.58	-0.47	-0.50	-0.37	-0.37	-0.44

En términos de carbono y biomasa, los resultados muestran que las situaciones sin gestión presentan valores relativamente elevados de biomasa almacenada en pie, comprendidos entre 11,44 y 12,28 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$, así como valores también altos de biomasa muerta en pie, entre 8,34 y 9,12 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$. Este patrón indica que, en ausencia de tratamientos selvícolas, las masas tienden a acumular una cantidad considerable de biomasa, tanto viva como muerta, lo que puede interpretarse como un indicador de persistencia estructural, pero también como una señal de elevada densidad y acumulación de material potencialmente problemático desde el punto de vista funcional y de vulnerabilidad. De forma coherente con ello, el carbono total alcanzó sus mayores valores en el itinerario 4 (12,74 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$), mientras que los itinerarios 1 y 3 mostraron valores algo inferiores.

29

En relación con el grupo hidrológico, la infiltración presentó valores altos en todos los itinerarios, con un rango entre 286,60 y 348 $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$. La escorrentía mostró una mayor variabilidad entre itinerarios. Mientras que en el itinerario 4 el valor simulado fue nulo, en el itinerario 3 alcanzó 39,35 $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$, claramente por encima de los valores observados en los itinerarios 1 y 2. Este contraste indica que la respuesta hidrológica superficial no es homogénea entre situaciones tipo y que existen diferencias relevantes en la partición del agua de lluvia según las condiciones biofísicas representadas por cada itinerario.

La transpiración, como indicador del consumo hídrico de la masa, presentó también diferencias notables. El itinerario 1 registró el valor más alto (171,82 $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$), seguido del itinerario 2 (143,54 $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$) y del itinerario 4 (121,65 $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$), mientras que el itinerario 3 mostró el menor valor (99,51 $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$). Estas diferencias reflejan distintos niveles de actividad ecofisiológica y de demanda hídrica del rodal. Del mismo modo, la intercepción y la evaporación mostraron variaciones entre itinerarios, aunque con un rango relativamente más contenido, lo que confirma que el balance hídrico responde de forma conjunta a la estructura de la masa y a las condiciones de sitio.

En cuanto al estado hídrico del suelo, tanto la humedad superficial como la humedad profunda presentaron valores muy similares entre itinerarios, con ligeras diferencias en torno a $0,148\text{--}0,153\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ para la fracción superficial y $0,142\text{--}0,147\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ para la fracción profunda. No obstante, el índice de estrés hídrico del suelo (SWCstress) fue elevado en todos los casos, con valores comprendidos entre 315,18 y 334,53, lo que confirma la fuerte limitación por agua que caracteriza el funcionamiento de estas masas. El itinerario 3 presentó el valor más alto de estrés hídrico, lo que sugiere una situación funcionalmente más restrictiva, mientras que el itinerario 1 mostró el valor más bajo dentro del conjunto analizado.

Desde el punto de vista del funcionamiento ecosistémico integrado, los valores de NEP fueron positivos en todos los itinerarios, lo que indica que las masas mantienen capacidad neta de acumulación de carbono en la situación sin gestión. Sin embargo, se observaron diferencias relevantes entre casos: el itinerario 2 presentó el valor más alto de NEP ($28,60\text{ kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), seguido del itinerario 1 ($27,84\text{ kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), mientras que el itinerario 4 mostró el menor valor ($18,93\text{ kgC}\cdot\text{m}^{-2}$). En paralelo, la eficiencia en el uso del agua (WUE) varió de forma importante entre itinerarios, desde $343,30\text{ L}\cdot\text{kgC}^{-1}$ en el itinerario 1 hasta $207,28\text{ L}\cdot\text{kgC}^{-1}$ en el itinerario 3, indicando diferencias en la relación entre consumo de agua y producción de carbono. En términos de respuesta ecofisiológica, la resistencia (R_{st}) se mantuvo cercana a 1 en todos los casos, mientras que la resiliencia (R_{sl}) presentó valores negativos, entre $-0,58$ y $-0,37$, lo que sugiere un comportamiento aún condicionado por las limitaciones ambientales y por una capacidad de recuperación moderada en ausencia de intervención.

30

Estas situaciones de referencia muestran que las masas sin gestión presentan una elevada acumulación de biomasa, un uso intenso del agua infiltrada dentro del sistema y una ausencia prácticamente total de percolación profunda, todo ello bajo condiciones de estrés hídrico elevado. Desde una perspectiva funcional, estos resultados indican que la ausencia de gestión no equivale necesariamente a una situación óptima, sino a un estado de equilibrio condicionado por la alta competencia por el agua y por una marcada limitación ecohidrológica. En este sentido, la cuantificación de los servicios ecosistémicos en las situaciones de control constituye un punto de partida esencial para evaluar posteriormente hasta qué punto la regulación de densidad y la aplicación de distintas secuencias de tratamiento pueden modificar estos balances y favorecer configuraciones más adaptadas a la finalidad de cada itinerario.

6. PAUTAS SELVÍCOLAS PARA LA PRODUCCIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

A partir de la base territorial definida en el entregable R1.1, de la caracterización biofísica de los casos de estudio y de la evaluación prospectiva realizada mediante Biome-BGC MuSo y DSS CAFE, se formulan a continuación pautas selvícolas generales para los distintos itinerarios de gestión identificados en las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia.

Estas pautas no deben interpretarse como prescripciones rígidas ni como recetas de aplicación automática, sino como orientaciones técnicas derivadas de la integración entre conocimiento bibliográfico, lógica ecohidrológica y resultados de simulación. Su aplicación deberá adaptarse en cada caso a las condiciones concretas de estación, estructura del rodal, accesibilidad, estado sanitario, intensidad de perturbación, objetivos de gestión y limitaciones operativas o presupuestarias existentes. No obstante, constituyen una base técnica útil para apoyar la priorización de actuaciones en un territorio caracterizado por una elevada heterogeneidad espacial, una fuerte vulnerabilidad climática y una limitada capacidad de intervención extensiva.

A efectos de interpretación, las soluciones seleccionadas para cada itinerario se comparan con un escenario de referencia sin gestión, definido sobre el mismo horizonte temporal de simulación que las alternativas optimizadas. Así, tanto los valores de la línea base o situación de referencia como los de las soluciones seleccionadas corresponden, en todos los casos, al estado o comportamiento de la masa al final del periodo simulado, equivalente a una edad de **65 años**. De este modo, las diferencias observadas entre la línea base y solución pueden atribuirse al efecto de la gestión sobre los servicios ecosistémicos priorizados en cada caso, y no a diferencias en la edad de la masa ni en la duración del periodo de análisis. En las variables de stock se considera el valor al final del periodo simulado, mientras que en las variables de flujo se emplea el valor medio anual del periodo de evaluación.

En las tablas de soluciones, el calendario de intervención se expresa mediante el **año de ejecución** y, entre paréntesis, la **edad de la masa en ese momento**, calculada a partir de un año de plantación de 2001. Así, por ejemplo, una intervención en 2031 corresponde a una masa de 30 años y se representa como **2031(30)**.

31

Desde el punto de vista operativo, la lectura de las soluciones propuestas debe hacerse en términos de **compromisos funcionales**. En los itinerarios productivos, el objetivo no es maximizar simultáneamente biomasa final, extracción, resiliencia y reducción del riesgo de ignición, ya que estas variables no evolucionan siempre en la misma dirección. En los itinerarios de conservación, tampoco se trata de maximizar de forma aislada la infiltración o la resistencia a sequía, sino de identificar el punto en que la regulación de densidad mejora la estabilidad del sistema sin comprometer la cobertura protectora ni aumentar la vulnerabilidad del suelo. En consecuencia, las soluciones seleccionadas deben entenderse como **compromisos técnicamente razonables**, adaptados a la lógica funcional de cada itinerario.

6.1. Itinerario 1 – Resistencia o resiliencia productivo maderable

En este itinerario, la gestión debe orientarse a compatibilizar la producción maderable con el mantenimiento de la estabilidad funcional de la masa. Ello implica conservar una estructura suficientemente productiva, pero evitando densidades excesivas que incrementen la competencia por el agua, favorezcan la acumulación de combustible fino y comprometan la respuesta del rodal frente a sequías prolongadas.

Desde una perspectiva selvícola, la regulación de la densidad debe favorecer los pies con mejor conformación, mayor vigor y mayor capacidad de sostener crecimiento bajo

condiciones limitantes. En consecuencia, las intervenciones recomendables son claras selectivas orientadas a reducir competencia intraespecífica, mejorar la estructura del rodal y disminuir la vulnerabilidad frente al estrés hídrico, procurando al mismo tiempo mantener una cobertura suficiente que evite una apertura excesiva del dosel y una exposición indeseada del suelo. En masas con estructura simple o con abundancia de pies dominados, mal conformados o sin porvenir, la selección debe centrarse en concentrar el crecimiento sobre los individuos con mejor potencial maderable y mejor comportamiento fisiológico esperado. De igual modo, cuando existan señales de decaimiento o debilitamiento diferencial, resulta coherente anticipar la extracción de los pies previsiblemente más vulnerables a la sequía, de modo que la masa remanente quede formada por individuos de mayor estabilidad y capacidad de respuesta.

En este itinerario, la opción de adaptación es la **resistencia**, pero también la **resiliencia**, por lo que puede incorporar también una lógica de **resiliencia** cuando la masa presente cierto margen de recuperación estructural tras la reducción de competencia. Por ello, la silvicultura no debe limitarse a “producir madera”, sino a sostener una masa productiva que siga siendo funcional bajo un escenario climático más restrictivo. En términos prácticos, esto implica que las claras no deben ser ni excesivamente débiles —porque mantendrían niveles de competencia demasiado altos— ni excesivamente fuertes —porque podrían comprometer la protección del suelo, la estabilidad microclimática y la persistencia del arbolado remanente—. Asimismo, la gestión de restos adquiere especial importancia, dado que la mejora estructural no debe traducirse en un aumento del riesgo de ignición por acumulación de combustible fino en superficie.

32

Los resultados de la DSS CAFE indican que, dentro del conjunto de soluciones eficientes obtenidas para este itinerario, las alternativas más adecuadas son aquellas que logran un compromiso equilibrado entre biomasa almacenada, madera extraída, resiliencia a sequía y riesgo de ignición, descartando como preferentes aquellas configuraciones que, aun mejorando algunos indicadores productivos o preventivos, presentan valores menos favorables desde el punto de vista adaptativo. En este contexto, la solución 29 se considera la opción más equilibrada, mientras que otras soluciones permiten representar perfiles de gestión más conservadores, más productivos u orientados a reforzar la resiliencia.

Tabla 7. Soluciones recomendadas para el itinerario 1.

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Biomasa almacenada (kgC·m ⁻²)	Madera extraída (kgC·m ⁻²)	Resiliencia a sequía, Rsl (adim)	Riesgo de ignición (gC·Pa·m ⁻²)	Perfil
29	2031(30) – 2048(47) – 2059(58)	30 – 50 – 30	6.39	6.54	0.18	1791.65	Mejor equilibrio global
6	2031(30) – 2047(46) – 2059(58)	30 – 30 – 30	7.20	5.56	0.15	1789.84	Opción más conservadora
5	2031(30) – 2048(47) – 2059(58)	50 – 50 – 30	6.14	7.12	0.20	1819.89	Máxima resiliencia

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Biomasa almacenada ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	Madera extraída ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	Resiliencia a sequía, Rsl (adim)	Riesgo de ignición ($\text{gC}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^{-2}$)	Perfil
13	2031(30) – 2048(47) – 2059(58)	30 – 40 – 30	6.81	6.06	0.16	1801.26	Compromiso biomasa–resiliencia
44	2031(30) – 2048(47) – 2059(58)	50 – 40 – 30	6.42	6.70	0.19	1802.12	Compromiso productivo–adaptativo
39	2031(30) – 2048(47) – 2059(58)	50 – 40 – 40	5.99	7.23	0.15	1807.52	Opción más productiva

En comparación con el escenario sin gestión, las soluciones seleccionadas muestran que la regulación de densidad reduce de forma clara la acumulación final de biomasa en pie y de biomasa muerta, al tiempo que incrementa la extracción de producto y modifica de manera significativa la respuesta funcional del sistema. La principal lectura de estas soluciones no debe hacerse en términos de maximización aislada de una sola variable, sino como una corrección de una situación inicial de elevada competencia, encaminada a orientar el rodal hacia un estado más compatible con la persistencia productiva bajo condiciones de aridificación creciente.

La comparación detallada entre la línea base y las soluciones seleccionadas pone de manifiesto que la mejora de la resiliencia a sequía conlleva necesariamente compromisos con otras variables, especialmente con la cantidad final de biomasa almacenada. En este sentido, la gestión propuesta para este itinerario debe entenderse como una estrategia de ajuste funcional de la masa y no únicamente como una operación de aprovechamiento.

33

Tabla 8. Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 1.

Métrica	Unidad	Línea base	Solución				
			29	6	5	13	44
Biomasa extraída	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	0.00	7.14	6.07	7.82	6.62	7.34
Biomasa en pie	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	11.61	6.39	7.20	6.14	6.81	6.42
Madera extraída	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	0.00	6.54	5.56	7.12	6.06	6.70
Biomasa muerta en pie	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	8.34	4.07	4.71	3.87	4.40	4.09
Esorrentía	$\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$	11.40	11.25	11.27	11.17	11.25	11.19
Infiltración	$\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$	348.00	345.34	345.79	342.66	344.75	344.39
Intercepción	$\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$	161.49	163.74	163.33	166.01	164.27	164.43
Evaporación	$\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$	178.73	185.93	184.73	187.25	184.85	187.27

Métrica	Unidad	Línea base	Solución				
			29	6	5	13	44
Humedad superficial	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.153	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Humedad profunda	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.147	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Estrés hídrico (SWCstress)	—	315.18	317.28	317.21	318.59	317.27	318.09
Transpiración	$\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$	171.82	162.53	164.11	159.02	163.07	160.55
NEP	$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$	27.84	29.07	29.29	30.02	29.45	29.58
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	$\text{L} \cdot \text{kgC}^{-1}$	343.30	347.30	346.00	340.47	344.71	344.19
Resistencia (Rst)	—	0.99	0.57	0.57	0.58	0.57	0.58
Resiliencia (Rsl)	—	-0.58	0.18	0.15	0.20	0.16	0.19

6.2. Itinerario 2 – Resistencia o resiliencia productivo biomasa

34

En este itinerario, la función productiva se orienta preferentemente hacia la movilización de biomasa, aunque manteniendo como condición esencial la mejora del comportamiento adaptativo del sistema. En consecuencia, la regulación de la densidad debe entenderse como una herramienta con doble finalidad: generar recurso aprovechable y, al mismo tiempo, reducir la competencia por el agua, disminuir la continuidad del combustible y mejorar la estabilidad funcional de la masa.

Desde el punto de vista operativo, las pautas selvícolas deben priorizar claras orientadas a disminuir densidades elevadas, facilitar la extracción de biomasa de bajo valor y conservar una estructura suficientemente estable tras la intervención. La lógica no es únicamente movilizar recurso, sino evitar que la mejora de productividad inmediata se consiga a costa de una mayor fragilidad funcional del sistema. Por ello, en este itinerario la retirada de producto debe ser selectiva y compatible con el mantenimiento de una fracción suficiente de cobertura y con la conservación de las funciones edáficas. En masas con elevada homogeneidad, fuerte acumulación de pies de pequeño diámetro o presencia significativa de individuos debilitados, la intervención debería concentrarse en reducir competencia, retirar árboles de peor condición y redistribuir el crecimiento y el agua disponible hacia el rodal remanente.

En términos de opción de adaptación, este itinerario combina una lógica de **resistencia** —porque reduce vulnerabilidad manteniendo la masa principal— con una lógica de **resiliencia** —porque busca mejorar la capacidad del sistema para seguir funcionando tras sequías y perturbaciones—. Desde esta perspectiva, la producción de biomasa solo es coherente si se integra en un esquema de mejora selvícola. De hecho, una extracción demasiado intensiva o mal secuenciada podría degradar el sistema en lugar de adaptarlo.

Por ello, resulta especialmente importante la planificación temporal entre intervenciones, así como la gestión de restos y de combustible superficial. Del mismo modo, la extracción de biomasa no debería comprometer de forma excesiva la cobertura orgánica del suelo ni la estabilidad edáfica, especialmente en las estaciones más limitantes.

Las soluciones eficientes obtenidas mediante la DSS CAFE indican que las alternativas más adecuadas son aquellas que mantienen una biomasa residual todavía suficiente, permiten una extracción relevante de madera y biomasa y presentan una resiliencia positiva, sin situarse en los valores menos favorables de riesgo de ignición. En este contexto, la solución 29 se considera la alternativa principal, mientras que el resto de soluciones seleccionadas permiten representar estrategias más prudentes, más resilientes o más productivistas.

Tabla 9. Soluciones recomendadas para el itinerario 2.

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Biomasa almacenada (kgC·m ⁻²)	Madera extraída (kgC·m ⁻²)	Resiliencia a sequía, Rsl (adim)	Riesgo de ignición (gC·Pa·m ⁻²)	Perfil
29	2031(30) – 2047(46) – 2059(58)	40 – 50 – 30	6.56	7.52	0.17	2118.73	Mejor equilibrio global
8	2031(30) – 2047(46) – 2059(58)	30 – 40 – 30	7.14	6.69	0.15	2109.67	Opción más conservadora
5	2031(30) – 2047(46) – 2059(58)	50 – 50 – 30	6.45	7.85	0.18	2143.41	Máxima resiliencia
13	2031(30) – 2042(41) – 2059(58)	30 – 50 – 30	6.92	6.96	0.13	2104.55	Menor riesgo de ignición
30	2031(30) – 2048(47) – 2059(58)	50 – 50 – 30	6.19	7.89	0.16	2116.61	Opción productiva– adaptativa

Respecto a la línea base, las soluciones seleccionadas muestran una reducción significativa de la biomasa almacenada en pie y de la biomasa muerta, acompañada de un incremento claro de biomasa y madera extraída. Al mismo tiempo, la resiliencia a sequía pasa de valores negativos en la situación sin gestión a valores positivos en las soluciones seleccionadas, lo que indica que la intervención modifica favorablemente la capacidad de respuesta de la masa frente a perturbaciones climáticas.

En este itinerario, por tanto, la extracción de biomasa no debe interpretarse como un fin aislado, sino como parte de una estrategia orientada a disminuir competencia, moderar la vulnerabilidad funcional y favorecer una estructura más compatible con la persistencia de la masa en condiciones limitantes.

Tabla 10. Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 2.

Métrica	Unidad	Línea base	Solución				
			29	8	5	13	30
Biomasa extraída	kgC·m ⁻²	0.00	8.23	7.28	8.61	7.66	8.66
Biomasa en pie	kgC·m ⁻²	12.28	6.56	7.14	6.45	6.92	6.19
Madera extraída	kgC·m ⁻²	0.00	7.52	6.69	7.85	6.96	7.89
Biomasa muerta en pie	kgC·m ⁻²	9.12	4.33	4.79	4.23	4.71	4.12
Escorrentía	mm·año ⁻¹	309.87	306.02	306.22	304.26	309.80	306.89
Infiltración	mm·año ⁻¹	165.44	169.15	168.87	170.76	165.74	168.27
Intercepción	mm·año ⁻¹	169.31	176.16	174.72	176.50	177.15	177.44
Evaporación	m ³ ·m ⁻³	0.149	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Humedad superficial	m ³ ·m ⁻³	0.144	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140
Humedad profunda	—	325.57	328.16	327.91	328.69	327.01	328.07
Estrés hídrico (SWCstress)	mm·año ⁻¹	143.54	133.03	134.76	131.11	135.41	132.65
Transpiración	kgC·m ⁻²	28.60	31.32	31.04	32.04	30.58	30.69
NEP	L·kgC ⁻¹	266.28	261.57	261.85	257.65	266.41	262.83
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	—	0.99	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
Resistencia (Rst)	—	-0.47	0.17	0.15	0.18	0.13	0.16
Resiliencia (Rsl)	kgC·m ⁻²	0.00	8.23	7.28	8.61	7.66	8.66

6.3. Itinerario 3 – Transición productivo biomasa

Este itinerario requiere una lógica de intervención más transformadora. A diferencia de los dos anteriores, aquí la finalidad no es solo mantener una masa productiva con mejor comportamiento adaptativo, sino favorecer una transición hacia estados estructuralmente más estables y funcionalmente más adecuados al contexto climático futuro. La producción de biomasa puede formar parte de ese proceso, pero no constituye el objetivo principal en sí mismo.

Las pautas selvícolas deben orientarse a corregir estructuras excesivamente densas o poco adaptadas, reducir vulnerabilidad frente a sequía e ignición y promover configuraciones más

estables. En este sentido, la extracción de biomasa debe interpretarse como una herramienta de mejora del sistema y no únicamente como un aprovechamiento. En la práctica, ello significa que las claras deben diseñarse no solo para extraer pies sobrantes, sino para abrir oportunidades de reorganización estructural, facilitar la renovación de la masa y, cuando el contexto de estación lo permita, favorecer una mayor heterogeneidad vertical, horizontal o incluso composicional. Por tanto, en este itinerario la intensidad de la intervención debe evaluarse no solo por la cantidad de biomasa movilizada, sino también por su capacidad para cambiar la trayectoria futura del rodal.

La opción de adaptación predominante es aquí la **transición**, aunque apoyada en mecanismos de **resiliencia** durante el proceso. En consecuencia, la gestión no busca simplemente que la masa actual resista mejor, sino que evolucione hacia una configuración más adecuada al nuevo contexto climático. Esto puede traducirse en la selección de pies con mayor plasticidad funcional, en la apertura localizada de huecos que faciliten la aparición de regeneración o especies acompañantes, en la reducción progresiva de estructuras demasiado homogéneas o en el favorecimiento de formaciones más mixtas y menos vulnerables, siempre que las condiciones ecológicas lo permitan. En este grupo, la extracción tiene sentido si ayuda a esa reconducción, no si la sustituye.

Los resultados de la DSS CAFE muestran que las soluciones más adecuadas son aquellas que mantienen un compromiso razonable entre biomasa residual, extracción, resiliencia y riesgo de ignición. La solución 18 constituye la alternativa más equilibrada, mientras que otras configuraciones permiten explorar perfiles más conservadores, más centrados en la reducción de ignición o más claramente orientados a la movilización de producto.

37

Tabla 11. Soluciones recomendadas para el itinerario 3.

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Biomasa almacenada (kgC·m ⁻²)	Madera extraída (kgC·m ⁻²)	Resiliencia a sequía, (adim)	Riesgo de ignición (gC·Pa·m ⁻²)	Perfil
18	2031(30) – 2045(44) – 2059(58)	50 – 50 – 30	5.68	7.41	0.16	1982.98	Mejor equilibrio global
26	2031(30) – 2047(46) – 2059(58)	40 – 50 – 30	5.79	7.19	0.15	1973.82	Opción más conservadora
19	2031(30) – 2046(45) – 2059(58)	40 – 50 – 30	5.74	7.14	0.14	1956.15	Menor riesgo de ignición
7	2031(30) – 2046(45) – 2059(58)	50 – 50 – 30	5.69	7.47	0.16	1989.54	Máxima resiliencia con mayor extracción
17	2031(30) – 2047(46) – 2059(58)	40 – 50 – 50	4.91	8.23	0.10	1977.18	Opción más productiva

Frente a la situación sin gestión, las alternativas seleccionadas muestran una disminución del capital biomásico final, pero esta reducción debe interpretarse en clave de transición adaptativa y no como una pérdida estrictamente negativa. En este itinerario, la gestión

persigue disminuir competencia, corregir fragilidad estructural y facilitar trayectorias más compatibles con un escenario de mayor aridez y perturbación.

La comparación con la línea base muestra además que la mejora de la resiliencia a sequía va acompañada de cambios en la partición del agua y en la dinámica del carbono, lo que confirma que este itinerario debe abordarse desde una lógica de transformación funcional de la masa y no únicamente desde el objetivo de movilización de biomasa.

Tabla 12 . Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 3.

Métrica	Unidad	Línea base	Solución				
			18	26	19	7	17
Biomasa extraída	kgC·m ⁻²	0.00	8.03	7.78	7.72	8.09	8.91
Biomasa en pie	kgC·m ⁻²	11.44	5.68	5.79	5.74	5.69	4.91
Madera extraída	kgC·m ⁻²	0.00	7.41	7.19	7.14	7.47	8.23
Biomasa muerta en pie	kgC·m ⁻²	8.50	3.69	3.78	3.75	3.68	3.00
Escorrentía	mm·año ⁻¹	39.35	40.32	39.61	40.44	39.97	39.55
Infiltración	mm·año ⁻¹	306.72	311.24	309.54	311.96	309.84	309.33
Intercepción	mm·año ⁻¹	131.34	126.90	128.50	126.26	128.21	128.73
Evaporación	mm·año ⁻¹	174.55	186.32	183.95	185.39	185.48	184.14
Humedad superficial	m ³ ·m ⁻³	0.148	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Humedad profunda	m ³ ·m ⁻³	0.142	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140
Estrés hídrico (SWCstress)	—	334.53	335.62	336.00	335.31	335.91	336.03
Transpiración	mm·año ⁻¹	99.51	91.21	92.70	92.66	91.09	92.33
NEP	kgC·m ⁻²	22.25	22.44	22.67	21.79	22.97	23.11
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	L·kgC ⁻¹	207.28	211.52	211.86	214.60	209.44	213.42
Resistencia (Rst)	—	0.99	0.58	0.58	0.57	0.58	0.37
Resiliencia (Rsl)	—	-0.50	0.16	0.15	0.14	0.16	0.10

6.4. Itinerario 4 – Resistencia conservación

En este itinerario, la finalidad principal es protectora. La gestión debe orientarse a reforzar la resistencia de la masa frente a sequía, reducir el riesgo de ignición y mejorar el funcionamiento hídrico sin generar aperturas excesivas del dosel ni pérdidas significativas de cobertura protectora. En consecuencia, la intervención selvícola debe regirse por un criterio de prudencia mayor que en los itinerarios productivos.

Desde esta lógica, las actuaciones recomendables son tratamientos moderados de regulación de densidad, acompañados de una gestión cuidadosa de restos y de especial atención al mantenimiento de las funciones protectoras del suelo y del microambiente. La extracción de producto no constituye aquí el objetivo central, sino un efecto secundario de intervenciones orientadas a mejorar estabilidad y regulación ecohidrológica. En las masas incluidas en este itinerario, la selección de pies debe responder principalmente a criterios de sanidad, competencia, estabilidad y protección, evitando tanto la permanencia de estructuras excesivamente densas como aperturas que puedan aumentar la exposición del suelo, favorecer erosión o alterar de forma abrupta el microclima del rodal.

La opción de adaptación dominante es la **resistencia**. Por ello, la finalidad no es transformar la masa ni maximizar la extracción, sino mantenerla funcionalmente operativa bajo condiciones más adversas, reduciendo vulnerabilidades sin alterar en exceso su organización básica. En la práctica, esto implica priorizar intervenciones de intensidad baja o moderada, con un sesgo claro hacia la conservación del suelo, la infiltración y la estabilidad de la cubierta. En laderas, cabeceras de cuenca o enclaves particularmente sensibles, la reducción de densidad debe aplicarse con especial cautela y siempre en coherencia con la función protectora de la unidad.

La DSS CAFE muestra que la solución 3 es la alternativa más coherente con este planteamiento, ya que combina la mejor infiltración y el menor riesgo de ignición del conjunto, aunque con una resistencia a sequía ligeramente inferior a otras opciones. Desde una perspectiva funcional, esa pequeña diferencia en resistencia queda compensada por una respuesta hidrológica y preventiva más favorable.

Tabla 13. Soluciones recomendadas para el itinerario 4.

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Resistencia a sequía, Rst (adim)	Riesgo de ignición ($\text{gC} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m}^{-2}$)	Infiltración ($\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$)	Perfil
3	2027(26) – 2043(42) – 2061(60)	30 – 20 – 40	0.97	2188.09	282.38	Mejor compromiso protector–hidrológico
1	2027(26) – 2046(45) – 2064(63)	30 – 20 – 20	0.98	2241.44	278.26	Opción más conservadora
4	2027(26) – 2046(45) – 2064(63)	30 – 20 – 30	0.98	2245.42	278.54	Opción intermedia

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Resistencia a sequía, Rst (adim)	Riesgo de ignición (gC·Pa·m ⁻²)	Infiltración (mm·año ⁻¹)	Perfil
2	2027(26) – 2046(45) – 2064(63)	30 – 20 – 40	0.98	2249.97	278.79	Opción más intensiva, menos favorable en ignición

En comparación con la situación sin gestión, la solución seleccionada no maximiza necesariamente todos los indicadores, pero sí representa, dentro del conjunto de intervenciones evaluadas, la combinación más coherente con la lógica protectora del itinerario. La gestión propuesta para este caso no debe leerse como una intensificación del uso del monte, sino como una intervención moderada orientada a reducir vulnerabilidad, reorganizar la estructura del rodal y mantener las funciones conservadoras del sistema.

La comparación con la línea base permite apreciar que incluso tratamientos de baja o moderada intensidad alteran la partición del agua, reducen la biomasa acumulada y modifican la dinámica ecofisiológica de la masa. En este tipo de unidades, por tanto, la clave no reside en maximizar la extracción, sino en encontrar el punto en que la regulación de densidad mejora la estabilidad funcional sin comprometer la cobertura protectora ni la conservación del suelo.

Tabla 14. Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas para el itinerario 4.

Métrica	Unidad	Línea base	Solución			
			3	1	4	2
Biomasa extraída	kgC·m ⁻²	0.00	7.04	5.51	6.40	7.30
Biomasa en pie	kgC·m ⁻²	11.60	6.54	7.72	6.84	5.95
Madera extraída	kgC·m ⁻²	0.00	6.48	5.07	5.90	6.74
Biomasa muerta en pie	kgC·m ⁻²	8.76	4.45	5.66	4.98	4.31
Infiltración	mm·año ⁻¹	286.60	282.38	278.26	278.54	278.79
Intercepción	mm·año ⁻¹	121.96	126.60	130.44	130.15	129.90
Evaporación	mm·año ⁻¹	170.09	172.28	170.37	170.59	170.73
Humedad superficial	m ³ ·m ⁻³	0.148	0.150	0.150	0.150	0.150
Humedad profunda	m ³ ·m ⁻³	0.144	0.140	0.140	0.140	0.140
Estrés hídrico (SWCstress)	—	325.44	328.47	330.29	330.21	330.09
Transpiración	mm·año ⁻¹	121.65	114.81	113.15	113.21	113.33
NEP	kgC·m ⁻²	18.93	21.73	22.25	22.02	21.84

Métrica	Unidad	Línea base	Solución			
			3	1	4	2
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	L·kgC ⁻¹	256.56	249.51	235.87	237.10	238.45
Resistencia (Rst)	—	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
Resiliencia (Rsl)	—	-0.37	-0.92	-0.50	-0.50	-0.50

6.5. Itinerario 5 – Resiliencia conservación

Este itinerario se orienta a reforzar la capacidad de recuperación del sistema tras perturbaciones, manteniendo al mismo tiempo su función protectora. En este caso, la gestión no debe centrarse en maximizar la extracción ni en reducir de forma intensa la cobertura, sino en favorecer una estructura forestal capaz de absorber episodios de sequía, mantener estabilidad funcional y recuperar su funcionamiento tras eventos adversos, sin comprometer la protección del suelo ni el papel regulador de la masa.

Desde el punto de vista selvícola, ello implica actuar preferentemente sobre la competencia excesiva, sobre los pies debilitados o mal conformados y sobre aquellas configuraciones estructurales que reduzcan la capacidad de respuesta del rodal. En este itinerario, la selvicultura debe aplicarse con una lógica de mejora progresiva de la estabilidad, buscando masas menos vulnerables, con menor continuidad de combustible y con mejor equilibrio entre cobertura, vigor y funcionamiento hídrico. En consecuencia, las claras deben mantenerse en intensidades moderadas, evitando aperturas bruscas del dosel que puedan generar efectos indeseados sobre el microambiente o sobre la protección edáfica.

Aunque el itinerario se enmarca dentro de una lógica general de resiliencia-conservación, los resultados obtenidos no muestran una mejora del indicador modelizado de resiliencia a sequía (Rsl) respecto a la situación sin gestión. En consecuencia, la interpretación de las soluciones seleccionadas debe hacerse principalmente en términos de estabilización preventiva del sistema, reducción de parte de la carga estructural y moderación del riesgo de ignición, más que como una mejora directa e inmediata de la resiliencia simulada. Esta elección permite identificar aquellas secuencias de intervención que, sin abandonar la finalidad protectora, mejoran la estabilidad ecohidrológica del sistema y reducen parte de su vulnerabilidad frente a perturbaciones. En este contexto, conviene interpretar los resultados teniendo en cuenta que las diferencias entre soluciones son relativamente pequeñas en términos absolutos, lo que indica que el margen de optimización en este itinerario es más estrecho que en los itinerarios productivos y que la gestión debe aplicarse con un criterio especialmente prudente.

Los resultados obtenidos muestran, en conjunto, un patrón bastante coherente: todas las soluciones mantienen valores de resistencia a sequía altos (0,97–0,98) y un rango relativamente estrecho de infiltración. Por tanto, la diferencia entre alternativas no reside en cambios drásticos del funcionamiento del sistema, sino en matices relevantes en el equilibrio entre estabilidad estructural, reducción del riesgo de ignición y respuesta hidrológica. En este marco, la **solución 2** se considera la alternativa más equilibrada, ya

que combina un riesgo de ignición muy bajo, una biomasa remanente todavía relativamente alta y una intensidad de intervención moderada. La **solución 3** representa el perfil más conservador, al mantener la mayor biomasa en pie y la resistencia más alta del conjunto, aunque con peores valores de ignición e infiltración. La **solución 6** ofrece un perfil interesante desde el punto de vista hidrológico, con una infiltración alta y un nivel de biomasa remanente intermedio. Por su parte, la **solución 5** constituye una alternativa intermedia con buena reducción del riesgo y una secuencia de intervención equilibrada, mientras que la **solución 1** puede interpretarse como una opción algo más intensiva, con mayor movilización de producto y la infiltración más alta del conjunto, aunque con menor biomasa final y peor comportamiento en ignición que las soluciones más conservadoras.

Tabla 15. Soluciones recomendadas para el itinerario 5

Solución	Calendario de intervención	Intensidad de clara (%)	Biomasa almacenada ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	Madera extraída ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	Resistencia a sequía, Rst (adim)	Riesgo de ignición ($\text{gC}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^{-2}$)	Infiltración ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$)	Perfil
2	2027 (26) – 2044 (43) – 2061 (60)	40 – 20 – 30	6.91	6.04	0.97	2073.84	285.55	Mejor equilibrio global
3	2027 (26) – 2043 (42) – 2060 (59)	20 – 20 – 30	7.56	5.21	0.98	2101.71	282.24	Opción más conservadora
6	2027 (26) – 2045 (44) – 2064 (63)	40 – 20 – 30	6.33	6.17	0.97	2090.42	286.13	Compromiso hidrológico
5	2027 (26) – 2044 (43) – 2063 (62)	40 – 20 – 40	5.85	6.89	0.97	2078.56	285.84	Perfil intermedio preventivo–adaptativo
1	2027 (26) – 2045 (44) – 2064 (63)	40 – 20 – 40	5.53	6.95	0.97	2094.03	286.29	Opción más intensiva con máxima infiltración

En comparación con la situación sin gestión, las soluciones seleccionadas para el itinerario 5 muestran una reducción clara de la biomasa en pie y de la biomasa muerta acumulada, acompañada de una disminución de la transpiración y de un incremento del NEP. Este patrón indica que la gestión moderada de la densidad permite aliviar parcialmente la carga estructural del rodal y mejorar ciertos aspectos del funcionamiento ecofisiológico sin comprometer su carácter protector. No obstante, la infiltración apenas mejora respecto a la línea base, e incluso se reduce ligeramente en todas las soluciones analizadas, mientras que la resiliencia modelizada frente a sequía (Rsl) permanece negativa en todos los casos. Por ello, en este itinerario la silvicultura debe interpretarse sobre todo como una herramienta de estabilización preventiva, orientada a reducir vulnerabilidad, mantener resistencia y limitar el riesgo de deterioro funcional, más que como una vía para maximizar la recuperación tras perturbación.

Tabla 16. Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas del itinerario 5.

Métrica	Unidad	Línea base	Soluciones				
			2	3	6	5	1
Biomasa extraída	kgC·m ⁻²	0.00	6.60	5.63	6.71	7.48	7.53
Biomasa en pie	kgC·m ⁻²	11.54	6.91	7.56	6.33	5.85	5.53
Madera extraída	kgC·m ⁻²	0.00	6.04	5.21	6.17	6.89	6.95
Biomasa muerta en pie	kgC·m ⁻²	8.71	4.80	5.31	4.62	4.07	4.00
Infiltración	mm·año ⁻¹	287.21	285.55	282.24	286.13	285.84	286.29
Intercepción	mm·año ⁻¹	121.33	123.63	126.61	122.98	123.23	122.81
Evaporación	mm·año ⁻¹	170.81	175.99	171.78	176.17	176.03	176.22
Humedad superficial	m ³ ·m ⁻³	0.148	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
Humedad profunda	m ³ ·m ⁻³	0.144	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140
Estrés hídrico (SWCstress)	—	324.75	327.35	328.49	327.23	327.32	327.17
Transpiración	mm·año ⁻¹	121.59	114.15	115.40	114.71	114.60	114.82
NEP	kgC·m ⁻²	18.81	20.86	21.43	19.33	20.01	19.22
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	L·kgC ⁻¹	258.41	255.24	247.62	254.79	257.27	256.01
Resistencia (Rst)	—	0.98	0.97	0.98	0.97	0.97	0.97
Resiliencia (Rsl)	—	-0.37	-0.88	-0.91	-0.41	-0.45	-0.41

6.6. Itinerario 6 – Transición conservación

En este itinerario, la silvicultura no debe orientarse únicamente a conservar el estado actual de la masa, sino a iniciar una transición progresiva hacia configuraciones estructuralmente más estables, menos vulnerables y más coherentes con las condiciones de aridez y perturbación del territorio, manteniendo en todo momento una orientación protectora. No obstante, conviene precisar que, en la configuración aplicada en este trabajo, la DSS CAFE evalúa únicamente secuencias de regulación de densidad sobre masas de *Pinus halepensis*. Por ello, sus resultados no representan la transición completa hacia un nuevo estado forestal, sino una fase inicial de reconducción selvícola, orientada a reducir

competencia, disminuir biomasa vulnerable acumulada y preparar la masa para una evolución posterior más adaptativa.

Desde el punto de vista selvícola, ello implica aplicar una regulación de densidad **gradual, selectiva y espacialmente prudente**, dirigida a reducir la competencia entre pies, disminuir la continuidad vertical y horizontal del combustible y favorecer una organización más heterogénea y funcional de la masa. En estas unidades, la gestión debe priorizar la selección de pies con mayor vigor, la eliminación de individuos dañados, mal conformados o previsiblemente más vulnerables al estrés hídrico, y la creación de condiciones que permitan, allí donde la estación lo haga viable, una evolución progresiva hacia estructuras menos homogéneas y más adaptadas. En consecuencia, la apertura del dosel debe ser moderada, evitando tratamientos excesivamente severos, especialmente en suelos someros, laderas frágiles o estaciones particularmente restrictivas.

A diferencia de los itinerarios productivos, aquí la extracción de biomasa o madera no constituye el objetivo principal, sino un **resultado subordinado a la mejora funcional del sistema**. La lógica de intervención debe centrarse en aliviar la competencia, reducir parte de la biomasa muerta acumulada, rebajar la predisposición estructural frente a perturbaciones y mantener una cobertura suficiente para no deteriorar el funcionamiento protector del monte. En esta clase de unidades resulta especialmente importante conservar la estabilidad del suelo, evitar alteraciones innecesarias por tránsito o extracción y mantener una gestión cuidadosa de los restos, de forma que la reducción del riesgo de ignición no se traduzca en una pérdida excesiva de materia orgánica o de protección superficial.

44

Las soluciones eficientes obtenidas muestran un patrón muy consistente: todas ellas parten de una **primera intervención temprana y ligera**, seguida de una segunda actuación intermedia y de una tercera intervención algo más intensa al final del periodo. Esta secuencia sugiere que, en el itinerario 6, la transición no debe abordarse mediante un único tratamiento fuerte, sino mediante una **reconducción paulatina** de la estructura del rodal. Asimismo, las diferencias entre soluciones son relativamente pequeñas en variables como infiltración, humedad del suelo o resistencia a sequía, lo que indica que el margen de optimización es estrecho y que las decisiones deben apoyarse sobre todo en el tipo de perfil de gestión que se quiera priorizar: más conservador, más equilibrado o algo más transformador.

En este contexto, la **solución 4** se considera la alternativa más equilibrada, ya que combina el menor riesgo de ignición del conjunto con una biomasa remanente relativamente alta, una extracción moderada y el mayor valor de NEP entre las soluciones analizadas. La **solución 2** representa la opción más conservadora, al mantener la misma biomasa final que la solución 4, pero con menor extracción y una secuencia de intervención algo más prudente. La **solución 1** puede interpretarse como una alternativa de compromiso, ligeramente más activa desde el punto de vista selvícola, mientras que la **solución 3** constituye la opción más transformadora, al intensificar la segunda intervención, aumentar la extracción y reducir en mayor medida la biomasa final, aunque con diferencias funcionales relativamente pequeñas respecto al resto.

Tabla 17. Soluciones recomendadas para el itinerario 6.

Solución	Calendario de intervención	de Intensidad de clara (%)	Biomasa almacenada ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	Madera extraída ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	Resistencia a sequía, (adim)	Riesgo a Rst ignición ($\text{gC}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^{-2}$)	de Infiltración ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$)	Perfil
4	2027 (26) 2044 (43) 2061 (60)	– 20 – 20 – 40	5.49	4.97	0.98	1631.19	317.24	Mejor equilibrio global
2	2027 (26) 2043 (42) 2061 (60)	– 20 – 20 – 40	5.49	4.96	0.98	1633.55	317.44	Opción más conservadora
1	2027 (26) 2043 (42) 2061 (60)	– 20 – 30 – 40	5.19	5.37	0.98	1638.36	317.38	Opción intermedia
3	2027 (26) 2044 (43) 2061 (60)	– 20 – 40 – 40	4.86	5.80	0.98	1633.45	317.25	Opción más transformadora

Respecto a la situación sin gestión, las soluciones seleccionadas muestran una **reducción clara de la biomasa en pie y de la biomasa muerta acumulada**, acompañada de una disminución de la interceptación y de la transpiración, mientras que la infiltración apenas varía respecto a la línea base. Este comportamiento indica que la gestión permite descargar parcialmente la estructura del rodal y reducir parte de su consumo hídrico sin alterar de forma apreciable la regulación hídrica básica del sistema. Al mismo tiempo, el NEP aumenta ligeramente en todas las soluciones, lo que sugiere que la masa mantiene capacidad de funcionamiento y acumulación neta de carbono bajo una estructura menos cargada.

45

No obstante, los resultados también muestran que el índice de resiliencia modelizada (Rsl) permanece claramente negativo en todas las alternativas y se sitúa por debajo de la línea base. Ello indica que, bajo las condiciones simuladas, la transición protectora no se traduce de forma inmediata en una mejora de ese indicador concreto de recuperación tras perturbación. Por tanto, en este itinerario la silvicultura debe interpretarse principalmente como una **herramienta de reconducción estructural y prevención**, cuyos efectos positivos se manifiestan sobre todo en la reducción de competencia, la moderación del consumo de agua, la disminución de biomasa vulnerable acumulada y la apertura de trayectorias más favorables para la estabilidad futura del sistema.

Tabla 18. Comparación entre la línea base y las soluciones seleccionadas del itinerario 6.

Métrica	Unidad	Línea Base	Soluciones			
			4	2	1	3
Biomasa extraída	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	0.00	5.27	5.25	5.68	6.16
Biomasa en pie	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	9.71	5.49	5.49	5.19	4.86
Madera extraída	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	0.00	4.97	4.96	5.37	5.80
Biomasa muerta en pie	$\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$	7.10	3.68	3.68	3.45	3.19

Métrica	Unidad	Línea Base	Soluciones			
			4	2	1	3
Infiltración	mm·año ⁻¹	317.72	317.24	317.44	317.38	317.25
Intercepción	mm·año ⁻¹	102.43	103.04	102.85	102.92	103.04
Evaporación	mm·año ⁻¹	188.22	192.60	192.78	193.71	194.40
Humedad superficial	m ³ ·m ⁻³	0.144	0.150	0.150	0.150	0.150
Humedad profunda	m ³ ·m ⁻³	0.143	0.150	0.150	0.150	0.150
Estrés hídrico (SWCstress)	—	314.61	314.90	314.71	314.67	315.01
Transpiración	mm·año ⁻¹	133.39	128.30	128.30	127.28	126.48
NEP	kgC·m ⁻²	19.37	19.70	19.60	19.52	19.45
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	L·kgC ⁻¹	333.66	333.70	333.84	332.68	333.00
Resistencia (Rst)	—	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
Resiliencia (Rsl)	—	-0.44	-0.95	-0.95	-0.95	-0.95

7. CONSIDERACIONES FINALES

El presente entregable tiene como finalidad traducir la clasificación espacial de las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia en orientaciones selvícolas coherentes con la estrategia adaptativa, la orientación funcional y la viabilidad de intervención de cada unidad territorial.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo integra un enfoque ecohidrológico de la gestión forestal, la evaluación multifuncional de servicios ecosistémicos bajo el marco CAFE y el uso combinado de herramientas de simulación y apoyo a la decisión, como Biome-BGC MuSo y la DSS CAFE (Pérez-Romero et al., 2025). Esta integración refuerza la base técnica de la planificación forestal en territorios semiáridos, al aportar criterios para priorizar actuaciones allí donde la intervención puede contribuir de forma más efectiva a mejorar la capacidad adaptativa de la masa y a reducir riesgos.

No obstante, las pautas selvícolas derivadas de este trabajo deben interpretarse en el contexto de las decisiones metodológicas adoptadas. Por una parte, se centran fundamentalmente en intervenciones de regulación de densidad mediante claras o clareos, al tratarse del tipo de actuación que ha podido representarse de forma operativa en los escenarios simulados con Biome-BGC MuSo y evaluados mediante la DSS CAFE. Por otra, los escenarios analizados no corresponden a rodales reales individualizados, sino a casos

teóricos estandarizados, contruidos a partir de valores medios de las principales variables de entrada para cada tipología de itinerario, incluidas las condiciones climáticas, edáficas, topográficas y dasométricas. Esta simplificación metodológica permite comparar de forma consistente distintas alternativas de gestión y analizar su efecto relativo sobre la provisión de servicios ecosistémicos, pero implica que los resultados deben entenderse como representativos de situaciones tipo y no como una reproducción exhaustiva de toda la variabilidad existente en las masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia.

En consecuencia, las propuestas aquí recogidas deben considerarse orientaciones generales de apoyo a la planificación, a la priorización espacial y a la toma de decisiones, susceptibles de adaptación posterior cuando se apliquen a montes, rodales o proyectos concretos.

En un contexto como el de la Región de Murcia, caracterizado por la aridez, la baja rentabilidad media de los aprovechamientos, la elevada exposición al cambio climático y la imposibilidad material de intervenir de manera homogénea sobre toda la superficie forestal, la gestión debe orientarse necesariamente hacia la priorización, la adaptación y la multifuncionalidad. Bajo esta lógica, la silvicultura deja de concebirse únicamente como un instrumento de aprovechamiento para consolidarse como una herramienta de sostenibilidad territorial, conservación funcional y producción de servicios ecosistémicos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N. J. M., Le Cozannet, G., & Lionello, P. (2022). Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2233–2272). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.021>
- Alsanousi, A. A., Abdul-Hamid, H., Mohamed, J., & Masoud, M. (2025). *Pinus halepensis* Mill. in the Mediterranean region: A review of ecological significance, growth patterns, and soil interactions. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 18, 30–37. <https://doi.org/10.3832/ifor4566-017>
- Álvarez, A., Gracia, M., Vayreda, J., & Retana, J. (2012). Patterns of fuel types and crown fire potential in *Pinus halepensis* forests in the Western Mediterranean Basin. *Forest Ecology and Management*, 270, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.039>
- Azcárate, F. M., Seoane, J., & Silvestre, M. (2023). Factors affecting pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) incidence in Mediterranean pine stands: A multiscale approach. *Forest Ecology and Management*, 529, 120728. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120728>
- Climate Change Service. (2019). CORDEX regional climate model data on single levels [Data set]. ECMWF. <https://doi.org/10.24381/CDS.BC91EDC3>

Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente. (2021). El cambio climático en la Región de Murcia: Del Acuerdo de París a la emergencia climática (F. Victoria Jumilla, Ed.).

del Río, M., Calama, R., & Montero, G. (2008). Selvicultura de *Pinus halepensis*. En Compendio de selvicultura aplicada en España. <https://gregoriomontero.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/pinus-halepensis-ok.pdf>

Díaz Montero, A., Vázquez-Camaño, M., Riesco-Amurrio, M. I., Fajardo-Cantos, A., Peña-Molina, E., Cano, M. C., Moya, D., de las Heras, J., Martín, S., Tomé Morán, J. L., Jordán

Gonzalez, E., Ameztegui, A., Torné-Solà, G., del Campo, A., & Blanco-Cano, L. (2025). Selvicultura adaptativa en los bosques mediterráneos de *Pinus halepensis*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 50(1), 185–196. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i50.19955>

Esteve Selma, M. Á., Carreño Fructuoso, M. F., Moya Pérez, J. M., Montoya Bernabéu, P. F., Martínez Fernández, J., Pérez Navarro, M. Á., & Lloret, F. (2018). Respuesta de los bosques de *Pinus halepensis* del sureste ibérico al cambio climático: Los eventos de sequía extrema. Agencia Estatal de Meteorología. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9990>

García Rodríguez, J. (2023, abril 25). La gestión forestal sostenible en la Región de Murcia: Estrategia y plan forestal de la Región de Murcia [Ponencia]. XLV Jornada Temática, Red de Autoridades Ambientales, Murcia, España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/servicios/red-de-autoridades-ambientales-raa/00-migraci%C3%B3n/02-lagestionforestalsostenibleenlaregiondemurciaestrategiayplanforestal_tcm30-564964.pdf

González Rincón, A., & Cabezas Cerezo, J. D. (2000). Actuaciones selvícolas sobre masas de pino carrasco procedente de repoblación con objeto de aumentar su diversidad biológica: Planificación y gestión a medio plazo en montes públicos de los TT.MM. de Lorca y Caravaca, Región de Murcia. Actas de la Reunión de Albacete del Grupo de Trabajo de Selvicultura, 10, 117–126. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i10.9223>

González-Sanchis, M., Ruiz-Pérez, G., del Campo, A. D., García-Prats, A., Francés, F., & Lull, C. (2019). Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility. Journal of Environmental Management, 231, 653–665. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.078>

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS ONE, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

Hidy, D., Barcza, Z., Hollós, R., Thornton, P. E., Running, S. W., & Fodor, N. (2026). Biome-BGCMuSo (Version 7.0) [Computer software]. Eötvös Loránd University. <https://nimbus.elte.hu/bbgc/download.html>

Instituto Geográfico Nacional. (2015–2021). Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 2 metros (MDT02) de España (MDT02-Cob2 2015–2021 CC-BY 4.0 scne.es) [TIF]. Centro de Descargas del CNIG. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/modelo-digital-terreno-mdt02-segunda-cobertura>

Jefatura del Estado. (2003, noviembre 22). Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. Boletín Oficial del Estado, 280. <https://www.boe.es/eli/es/l/2003/11/21/43>

Joint Research Centre. (2024, April 10). Wildfires: 2023 among the worst in the EU in this century. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/wildfires-2023-among-worst-eu-century-2024-04-10_en

Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Khorchani, M., & Romero-Díaz, A. (2021). Una revisión sobre las tierras abandonadas en España: De los paisajes locales a las estrategias globales de gestión. Cuadernos de Investigación Geográfica, 47(2), 477–521. <https://doi.org/10.18172/cig.4755>

Llorente, M., Rovira, P., Merino, A., Rubio, A., Turrión, M. B., Badía, D., Romanya, J., & González, J. C. J. A. (2018). Physical and chemical characteristics of soil horizons from the CARBOSOL Database of Spain [Data set]. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.884514>

Manrique-Alba, À., Beguería, S., Molina, A. J., González-Sanchis, M., Tomàs-Burguera, M., del Campo, A. D., Colangelo, M., & Camarero, J. J. (2020). Long-term thinning effects on tree growth, drought response and water use efficiency at two Aleppo pine plantations in Spain. Science of The Total Environment, 728, 138536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138536>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2012). Cuarto Inventario Forestal Nacional: Región de Murcia. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (1993). Métodos oficiales de análisis (Tomo I). MAPA.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2019). Anuario de Estadística Forestal 2017. Centro de Publicaciones. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/estadisticas/aef2017_completo_web_tcm30-521729.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). Anuario de Estadística Forestal 2022. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/forestal-anuario-2022.html>

Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados. (2023). Informe C: Incendios forestales y restauración de zonas quemadas. <https://doi.org/10.57952/W67P-J094>

Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., & Montanarella, L. (2012). European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29(2), 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>

Pelletier, J. D., Broxton, P. D., Hazenberg, P., Zeng, X., Troch, P. A., Niu, G., Williams, Z. C., Brunke, M. A., & Gochis, D. (2016). Global 1-km gridded thickness of soil, regolith, and sedimentary deposit layers (Version 1) [Data set]. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1304>

Pérez-Romero, J., Blanco-Cano, L., Lull-Noguera, C., Navarro-Cerrillo, R., & del Campo-García, A. D. (Manuscript submitted for publication). Multifunctional management alternatives to optimise different ecosystem services using CAFE DSS: A case study with a semiarid pine plantation.

Pérez-Romero, J., González-Sanchis, M., Blanco-Cano, L., & del Campo, A. D. (2025). Development of a multi-objective decision support system for eco-hydrological forest management that quantifies and optimizes ecosystem services related to Carbon, Water, Fire-risk and Eco-resilience (CAFE). *Journal of Environmental Management*, 380, 125103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125103>

50

Piqué, M., & Domènech, R. (2018). Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behavior in *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Science of The Total Environment*, 618, 1539–1546. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.316>

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

Sangüesa-Barreda, G., Linares, J. C., & Camarero, J. J. (2015). Reduced growth sensitivity to climate in bark-beetle infested Aleppo pines: Connecting climatic and biotic drivers of forest dieback. *Forest Ecology and Management*, 357, 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.017>

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>

Smithers, R. J., & Dworak, T. (2023). Assessing climate change risks and vulnerabilities (climate risk assessment): A DIY manual (Version 1).

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. Soil Science, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>