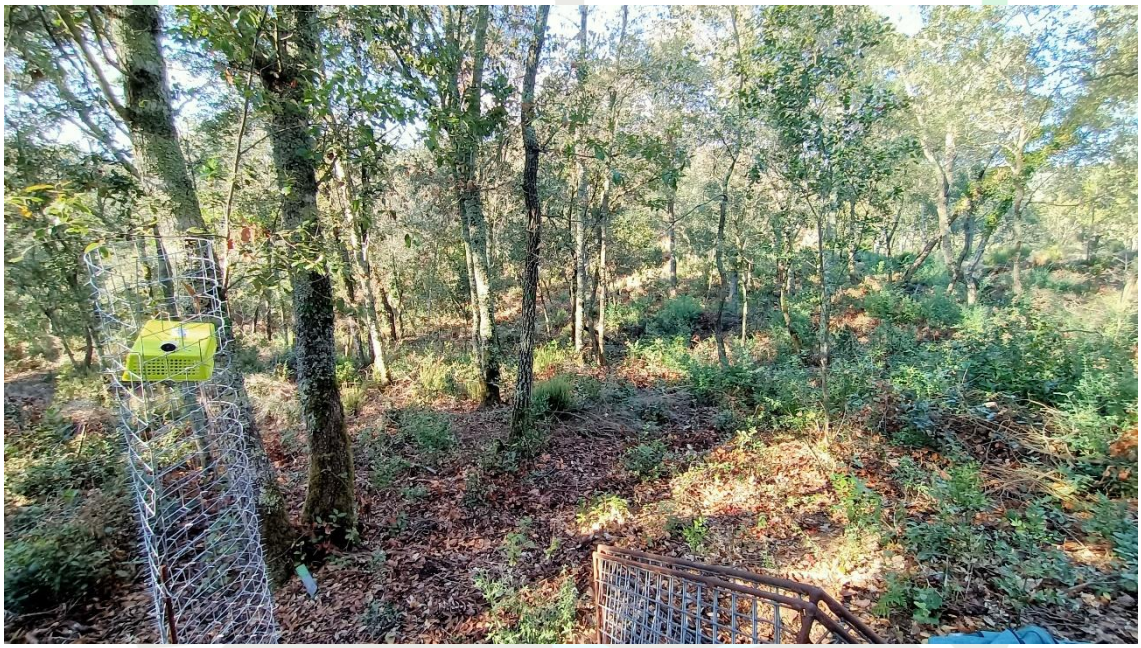
LIFE AgroForAdapt

Sistemas agroforestales para la adaptación al cambio climático de espacios agrícolas y forestales mediterráneos

LIFE20 CCA/ES/001682 10/2021 – 09/2026

https://agroforadapt.eu

ENTREGABLE ACCIÓN D4.2: Evaluación del microclima y vulnerabilidad a déficit hídrico de los sistemas silvopastorales adehesados (C3.2) o extensivos (C4)



Mayo 2026

Proyecto LIFE AgroForAdapt: Sistemas agroforestales para la adaptación al cambio climático de espacios agrícolas y forestales mediterráneos 10/2021 – 09/2026

Acción D4: Evaluación del microclima y vulnerabilidad a déficit hídrico de los sistemas silvopastorales adehesados (C3.2) o extensivos (C4)

Beneficiarios del proyecto: Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC; coordinador), Diputació de Barcelona (DiBa), Diputació de Girona (DiGi), Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació de la Generalitat de Catalunya (DACC), Fundació Emys (Emys), Agresta S. Coop. (Agresta), Agroof, SCOP (Agroof).

Cofinanciadores del proyecto: Diputació de Tarragona (DipTa). Agencia del Agua RMC (Fra-Montpellier)

Autores del entregable: Mar Gallego, Lena Vilà, Jordi Margalef, Guillem Llena, Marc Andreu, Jaime Coello, (CTFC); Beatriz de Torre, Lucía Yáñez, Jessica Esteban (Agresta)

El proyecto LIFE AgroForAdapt (LIFE20 CCA/ES/001682) está cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea. No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la CINEA. Ni la Unión Europea ni la autoridad concedente pueden ser consideradas responsables de ellos.

https://agroforadapt.eu

Executive summary

In AgroForAdapt we have established a network of 13 demonstration forests where advanced monitoring is applied. In each of these forests we have applied three different silvicultural treatments necessary to host silvopastoralism: i): low-intensity thinning; ii) high-intensity thinning; iii) control - no intervention. The forests are located in Soria (central-north Spain) and Catalonia (northeast Spain).

In this deliverable we describe the effects of these interventions on: i) several microclimatic variables (light availability, air temperature, air humidity, soil temperature, soil moisture); ii) water balance (based on simulations with *medfate* model); and iii) NDVI measured with satellite imagery. The study is conducted across three moments: pre-intervention; post-intervention and final monitoring (two or three growing seasons after the intervention).

The main findings are that increased cutting intensity (gradient high-intensity thinning – low-intensity thinning – control) leads to:

· higher sunlight penetration into the understory and ground vegetation. In high-intensity thinning systems, this effect is not uniform, as there are marked differences between areas below remnant trees and in the gaps created. This heterogeneity creates a mosaic of microclimatic conditions.

· greater temperature range, with lower temperatures in winter and higher temperatures in summer.

· decreased air relative humidity.

· increased soil temperature, especially during the summer.

· increased soil moisture (measured at depth: 10-20 cm), especially in the high-intensity thinning areas below the tree crown.

· increased soil moisture (modelled at 0-15 cm) and increased generation of blue water, especially in pine-dominated stands.

The increased soil moisture contrasts with the other variables, which would operate in the opposite direction (higher light and temperature, lower air humidity). This suggests that plant competition (tree and shrub density) appears to have a greater impact on soil moisture than the microclimate (relative humidity, insolation, temperature). These microclimatic changes affect the ecological niche for understory species and the regeneration of the tree layer. Depending on the intensity of the harvest, conditions may be created that are particularly favorable for species adapted to gradients in light, temperature range, relative humidity, and soil moisture.

In the case of the NDVI study, the silvicultural interventions lead to a rapid decline of NDVI as a result of the reduction of photosynthetic activity, with an effect proportional to thinning intensity. However, after two growing seasons the vegetation shows a fast response, leading to final values similar to control plots, suggesting that the vegetation cover restores its functional capacity, even when there is a lower number of trees.

In the context of climate change, with rising temperatures and the increased intensity and frequency of extreme events, it seems advisable to manage forests to achieve a gradient of conditions (tree and shrub density) to maintain a diversity of ecological niches, both for livestock and for the forage resources of the understory, by integrating the complex relationships between the atmosphere, soil, and vegetation into management practices.

1. Introducción 5
1.1. Contexto – acción D4.2 5
1.1.1. Sistemas silvopastorales de estudio 5
1.1.2. Descripción de los tratamientos selvícolas 6
1.2. Protocolo de seguimiento D4.2 7
1.2.1. Sistemas demostrativos de seguimiento avanzado e integral 7
1.2.2. Modificaciones que han debido realizarse respecto al protocolo 9
1.3. Resultados de la caracterización de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo 10
2. Resultados de luz, temperatura y humedad ambiental; temperatura del suelo 11
2.1. Resultados de luz incidida (insolación) 11
2.2. Resultados de temperatura del aire 13
2.3. Resultados de humedad relativa del aire 16
2.4. Resultados de temperatura del suelo 19
2.5. Resultados de humedad del suelo 21
2.6 Discusión conjunta de los resultados de luz, temperatura y humedad 22
3. Estudio del balance hídrico (medfate) 23
3.1. Metodología 23
3.2 Resultados y discusión del balance hídrico 24
4. Análisis de los índices de vegetación (teledetección satelital) 28
4.1. Introducción 28
4.2. Área de estudio 29
4.3. Investigación de imágenes 30
4.3.1. Elección del proveedor 30
4.3.2. Imágenes seleccionadas 31
4.3.3. Cálculo de NDVI 33
4.4. Resultados 33
4.4.1. Respuesta al tratamiento en los rodales de Cataluña 34
4.4.2. Respuesta al tratamiento en los rodales de Soria 39
4.5. Discusión 42
5. Diseminación de los resultados del entregable 44
Referencias 44

1. Introducción

1.1. Contexto – acción D4.2

La acción D4.2 busca evaluar el efecto de los sistemas silvopastorales a nivel del microclima y la vulnerabilidad al déficit hídrico, en comparación con sistemas convencionales forestales. Este entregable presenta los resultados del seguimiento aplicado. Este seguimiento se ha aplicado en los rodales de seguimiento avanzado, como se detalla en el Protocolo AgroForAdapt de seguimiento de silvopastoralismo en bosque.

1.1.1. Sistemas silvopastorales de estudio

El área de estudio incluye trece rodales demostrativos situados en diez localidades, de las cuales siete se localizan en Cataluña (Sant Climent de Llobregat, Sora, Sant Mateu de Bages, Sant Celoni en la Provincia de Barcelona; Aiguamúrcia (Tarragona), Monells y Cassà de la Selva (Girona) y tres en la provincia de Soria (Muriel Viejo, Soria y La Póveda).

Las localidades catalanas se distribuyen principalmente dentro de la región mediterránea, con climas mediterráneos típicos (Sant Climent y Aiguamúrcia), continental (Sant Mateu de Bages) y mediterráneos subhúmedos (Sora, Sant Celoni, Monells y Cassà de la Selva). En cambio, las localidades de Soria se sitúan en clima mediterráneo de montaña, caracterizado por temperaturas medias más bajas y una mayor continentalidad respecto a las áreas mediterráneas litorales.

Tabla 1. Clima y formaciones forestales de las localidades donde se ubican los sistemas silvopastorales de estudio.

Región	Localidad	Clima	Formación
Catalunya	Sant Mateu de Bages	Mediterráneo continental	Robledal con pinos
			Pinar de pino carrasco
	Sora	Mediterráneo Subhúmedo	Pinar de pino albar
			Robledal con pino albar
	Sant Climent de Llobregat	Mediterráneo típico	Pinar de pino carrasco
			Encinar
	Sant Celoni	Mediterráneo Subhúmedo	Encinar
	Aiguamúrcia	Mediterráneo típico	Pinar de pino carrasco
	Monells (Camps i Armet)	Mediterráneo Subhúmedo	Encinar con pinos
	Cassà de la Selva (Can Vilallonga)		
Castilla y León	Muriel Viejo	Mediterráneo de montaña	Melojar
	Soria		Pinar de pino albar
	La Póveda		

1.1.2. Descripción de los tratamientos selvícolas

En los pliegos de prescripciones técnicas particulares de cada rodal, se establecieron las especificaciones técnicas y operativas aplicables a cada tipo de actuación, con el objetivo de garantizar una correcta ejecución de los tratamientos y el cumplimiento de sus objetivos. En estos pliegos se determina también la gestión de los restos vegetales provenientes de las cortas y desbroces. Además, la descripción técnica detallada de los trabajos realizados en los sistemas silvopastorales se encuentra en los entregables de las acciones C3 (descripción sistemas adehesados) y C4 (descripción sistemas extensivos).

Generalmente se hicieron dos tipos de intervenciones por cada localidad y rodal. Un tratamiento general (aplicado en el conjunto del rodal) y otro tratamiento alternativo (aplicado en un espacio concreto, para comparar el tratamiento). Estos tratamientos fueron (1) claras por lo bajo y (2) adehesamientos. En los rodales codificados como C4 el tratamiento general fue (1) y el alternativo fue (2), mientras que en los rodales C3.2 se asignaron a la inversa. Además, se estableció una zona control, no intervenida. En definitiva, en cada rodal demostrativo se estableció un triplete de zonas de seguimiento: tratamiento general, tratamiento alternativo y área control. En cada una de estas zonas se realizaron las parcelas de seguimiento, que, por tanto, se basan en un conjunto similar de tratamientos en todos los rodales demostrativos.

Claras por lo bajo

Las claras por lo bajo son un tratamiento de reducción de la competencia de baja intensidad, estableciendo un espaciamiento medio de los árboles remanentes de aproximadamente 3 – 4 m.

En el caso de los pinares, los árboles con diámetro normal > 15 cm se aprovecharon extrayendo el fuste completo sin desramar, depositando posteriormente las copas y restos en pilas de biomasa para su trituración en zona de cargadero. Los pinos remanentes en el rodal fueron podados hasta un máximo de un tercio de la altura total del árbol. En el caso de los bosques de *Quercus* (encinas y robles), los individuos aprovechables para leña se extrajeron desramados, depositándose en cargadero y troceándose en piezas de aproximadamente 2,5 m de longitud.

Los pinos con diámetro normal < 15 cm, así como los *Quercus* no aprovechables para leña y los restos procedentes del desramado y de las podas, se trocearon *in situ,* generando fragmentos con una longitud inferior a 1 m, distribuidos homogéneamente sobre el terreno.

Adehesamiento

El adehesamiento consiste en una reducción intensa de la densidad arbolada, creando un estableciendo un espaciamiento de los árboles remanentes de 7 – 8 m de media.

Los árboles no comerciales (diámetro normal < 15 cm), así como los pinos y rebrotes de *Quercus* cortados que no resultaron aprovechables ni comercialmente ni como leña, se dejaron dispersos en el suelo, manteniendo los fustes completos siempre que fue posible. Las copas se separaron y trituraron *in situ.*

Desbroces selectivos

En ambos tratamientos, se realizaron desbroces selectivos del estrato arbustivo, manteniendo al menos un 25 % de la cobertura arbustiva y favoreciendo las especies más palatables de cada rodal, distribuidas en bosquetes sobre la superficie de actuación.

Los restos vegetales generados durante los desbroces se trituraron *in situ*, obteniendo fragmentos con una longitud máxima de 20 cm y un diámetro máximo de 5 cm, que se distribuyeron homogéneamente sobre el terreno, con el objetivo de favorecer la protección del suelo, la incorporación de materia orgánica y la no acumulación excesiva de restos vegetales.

La gestión de los residuos acumulados en las pilas de biomasa, se eliminaron mediante trituración, obteniendo fragmentos con dimensiones máximas de 10 cm de longitud y 2 cm de diámetro, que posteriormente se distribuyeron homogéneamente por los rodales de actuación.

La maquinaria empleada para la gestión de los restos vegetales fueron principalmente desbrozadoras manuales y desbrozadoras de martillos.

1.2. Protocolo de seguimiento D4.2

1.2.1. Sistemas demostrativos de seguimiento avanzado e integral

Los resultados se han recopilado de acuerdo con lo previsto en el protocolo de seguimiento. Como se describe en aquel documento, el seguimiento D4 se aplica sobre los sistemas seleccionados como de **"seguimiento avanzado"** o "**integral**" (Tabla 2), y la evaluación de cada rodal se centra en los tripletes de parcelas permanentes de inventario instaladas en la acción D2.2: una sujeta a adehesamiento, otra a silvopastoralismo extensivo (clara) y otra sin intervención (control). Cada triplete se instaló en un rodal o rodales contiguos con condiciones similares. Se ha realizado la evaluación de los sistemas en tres momentos distintos: justo antes de las intervenciones selvícolas, justo después y al final del proyecto (2 o 3 periodos vegetativos después de la intervención, en función del sistema).

En los rodales de seguimiento integral las variables seguidas fueron 4: Temperatura ambiental, humedad relativa, temperatura del suelo e iluminancia. Se instrumentalizó una parcela por rodal y tipo de intervención. Para observar el efecto de los árboles remanentes en los sistemas adehesados, en las zonas adehesadas de Cataluña se pusieron sensores en zonas de claro (lo más lejos posible de las copas de los árboles – "adehesamiento-claro") y en zonas bajo una copa de un árbol (adehesamiento-sombra).

Tabla 2. Rodales asignados a seguimiento avanzado e integral y variantes de intervención.

Socio	Rodal	Triplete	Localidad	Seguimiento integral	Fecha de tratamiento	Años seguimiento post intervención
CTFC	4K+3.2G	T1	Sant Mateu de Bages	Sí	Diciembre 2022-enero 2023	3
	4J+3.2G	T2		No		3
	4M/4O	T3	Sora	No	Febrero-marzo 2023	3
	3.2F+4M	T4	Sora	Sí		3
	3.2A	T5	Sant Climent de Llobregat	Sí	Octubre 2023	2
	3.2A+4B	T6		No		2
	4R	T7	Sant Celoni	No	Febrero-marzo 2023	3
	4A	T8	Aiguamúrcia	No	Diciembre 2022-enero 2023	3
AGRESTA	4U	T9	Muriel Viejo	No	Octubre 2022	3
	4E	T10	Soria	No	Octubre 2022	3
	3.2D	T11	La Póveda	No	Octubre 2023	2
DiGi	4C	T12	Monells	No	Primavera 2025	1
	4D	T13	Cassà de la Selva	No	Primavera 2025	1

Tabla 3. Resumen los protocolos de seguimiento que conforman el protocolo D4.2

Tipo	Seguimiento	Protocolo (apartado 3)
Avanzado	Temperatura, luz y humedad ambiental; temperatura del suelo	D4.2P1
	Humedad suelo (puntual + modelo Medfate)	D4.2P2
	Índices de vegetación (teledetección satelital)	D4.2P3
Integral	Disponibilidad relativa de luz (ceptómetro)	D4.2P4
	Humedad del suelo, continua	D4.2P5

Variables seguidas. Los datos recopilados se organizan en tres bloques:

- **Microclima aéreo**: temperatura, iluminancia (cantidad de luz) y humedad ambiental
- **Balance hídrico:** mediante modelos de simulación (*medfate)* a partir de datos de estructura y composición de la vegetación, series meteorológicas y características de sitio.
- **Humedad del suelo:** Humedad del horizonte A.
- **Índices de vegetación:** mediante técnicas de teledetección satelital

1.2.2. Modificaciones que han debido realizarse respecto al protocolo

A lo largo del proyecto ha sido necesario realizar diversos ajustes a las parcelas demostrativas objeto del presente protocolo, como se ha descrito en las diferentes certificaciones técnicas. La Tabla 4 muestra las adaptaciones que se han realizado, respecto al protocolo inicial.

Tabla 4. Adaptaciones realizadas en las parcelas de seguimiento, y los motivos que han hecho necesario el cambio

Socio	Rodales	Cambios realizados	Justificación
CTFC	4R	En la parcela donde se iba a realizar un adehesamiento finalmente sólo se hizo desbroce	Cambio de criterio por parte del propietario forestal
DIGI	4D; 4C	En los tripletes de la Diputación de Girona no se ha realizado un seguimiento de la vulnerabilidad hídrica	En la formulación del proyecto no se hizo la previsión de suficientes sensores de humedad del suelo. Además, el retraso en la ejecución de los tratamientos hizo que estos rodales fueran los menos prioritarios para el seguimiento, al disponerse de un único período vegetativo de seguimiento
CTFC	3.2A (T_5), 4K+3.2G (T_1)	Las parcelas de seguimiento integral han pasado a ser avanzado.	Los sensores de humedad del suelo han dado problemas y sólo se ha podido realizar el seguimiento integral en el triplete T_4
CTFC	4J+3.2G (T_2)	La parcela control se desbrozó (aunque no se intervino en el estrato arbóreo)	Interés de aumentar superficie pastoral por parte del propietario
Todos	Todos	Se ha prescindido de las medidas con ceptómetro	Se ha optado por tomar medidas directas (sensores de iluminancia (Lx), en continuo, para facilitar la comparación entre rodales
		Pérdida de datos de los sensores de microclima	Fallos técnicos de algunos sensores (problemas electrónicos o daños por problemas en el aislamiento frente a la humedad), desaparición de sensores del suelo debidas a la remoción del suelo por la fauna o por erosión.

1.3. Resultados de la caracterización de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo

Los resultados muestran cambios significativos en la estructura y dinámica de los diferentes estratos tras los tratamientos silvícolas.

En el estrato arbóreo, las parcelas intervenidas, especialmente las adehesadas, presentan una mayor reducción del área basimétrica comparado con las parcelas control. La densidad de pies disminuye claramente en los sistemas adehesados, aunque en los rodales de quercíneas se mantiene generalmente más alta, en parte debido a su carácter rebrotador. En algunos casos se observa un aumento del número de pies tras los tratamientos, explicado por la incorporación al inventario de individuos que superan el umbral mínimo de diámetro (7,5 cm).

En el estrato arbustivo, los tratamientos generan una reducción inicial tanto del recubrimiento como de la biomasa, más acusada en las parcelas adehesadas; no obstante, esta disminución tiende a revertirse con el tiempo, especialmente en rodales de quercíneas, donde predominan especies con alta capacidad de rebrote. En algunos casos, la biomasa aumenta tras la intervención debido al rebrote y a la liberación de competencia, junto a la falta de una presión herbívora adecuada.

Finalmente, en el estrato herbáceo, los tratamientos favorecen claramente un aumento del recubrimiento, especialmente en las parcelas adehesadas. Este incremento es más acusado en rodales de quercíneas, donde la mayor apertura del dosel mejora la disponibilidad de luz, favoreciendo el desarrollo de especies herbáceas de crecimiento rápido.

En conjunto, los tratamientos generan una estructura más abierta, con menor recubrimiento de arbustivo y mayor crecimiento del estrato herbáceo.

2. Resultados de luz, temperatura y humedad ambiental; temperatura del suelo

2.1. Resultados de luz incidida (insolación)

La insolación que atraviesa el dosel arbóreo es un factor que determina el desarrollo y la comunidad de las especies arbustivas y herbáceas (sotobosque). La insolación favorece el crecimiento de herbáceas aptas para el pasto, así como el rebrote de ciertos arbustos que pueden ser palatables. Sin embargo, un exceso de insolación recibida en el sotobosque puede incrementar la evapotranspiración. En nuestros sistemas de estudio, se ha recogido la iluminancia (en Lux) como indicador de insolación. Aunque no es la misma variable -ya que la iluminancia no calcula directamente la energía solar recibida-, en condiciones normales se considera que: 1 lux ≈ 0.0083 $W \cdot m^{-2}$ o 1 lux ≈ 0.018 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, por lo tanto, son equivalentes si comparamos distintos tratamientos en un mismo sistema. Para los sistemas de seguimiento de Cataluña (CTFC), se midió la iluminancia en 4 puntos: en la parcela control, en parcelas con tratamiento de clara; en el caso de las parcelas con tratamiento de adehesamiento se midió en dos puntos concretos: una en una zona con bajo un árbol (adehesamiento-sombra) y en una sin influencia (adehesamiento-claro). En los sistemas de Castilla y León (Agresta, T10 Y T11), hay una única medida de iluminancia en el adehesamiento.

En general el sotobosque de las parcelas control recibió menos luz que las parcelas con tratamientos de clara como de adehesamiento (tanto en las zonas de claro como de sombra). Las parcelas con más insolación, como era previsible, son las de adehesamiento-claro, sin influencia del dosel. Las medias de insolación en las parcelas del tratamiento de clara son mayores que en las zonas control y que en las zonas de adehesamiento-sombra y de adehesamiento-claro (Tabla 5, Figuras 1 y 2).

Estas diferencias son más acusadas durante los meses de verano (junio a agosto), donde hay un aumento del 236% respecto a la iluminancia en las parcelas control, mientras que en las parcelas en las que se realizaron claras, la diferencia fue del 114%. En las zonas de adehesamiento-sombra hubo un 61% más de iluminancia que en las zonas control.

El efecto de los tratamientos en la iluminancia durante el invierno (enero a marzo) fue menor. En ese periodo, las zonas adehesada-claro recibieron un 125% más de luz que las zonas control mientras que las zonas con claras recibieron un 90% más de luz. Las zonas adehesado-claro recibieron un 45% más de luz que el control.

En definitiva, el efecto de las actuaciones varía a lo largo del año. El efecto es mayor durante los meses de verano que es cuando hay más insolación y estrés térmico e hídrico.

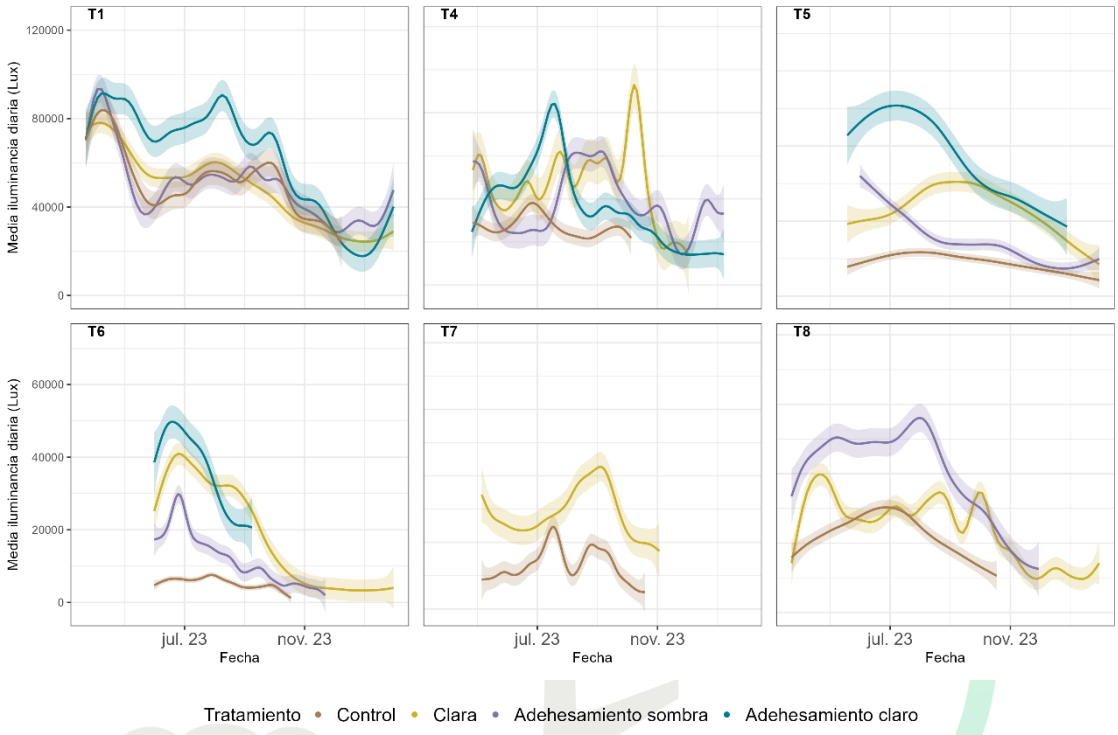


Figura 1: Iluminancia media diaria recibida en el sotobosque (1,5 m de altura) de los tripletes T1, T4, T5, T6, T7 y T8. Los sensores de los sistemas T2 y T3 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos electrónicos y/o la pérdida del propio sensor.

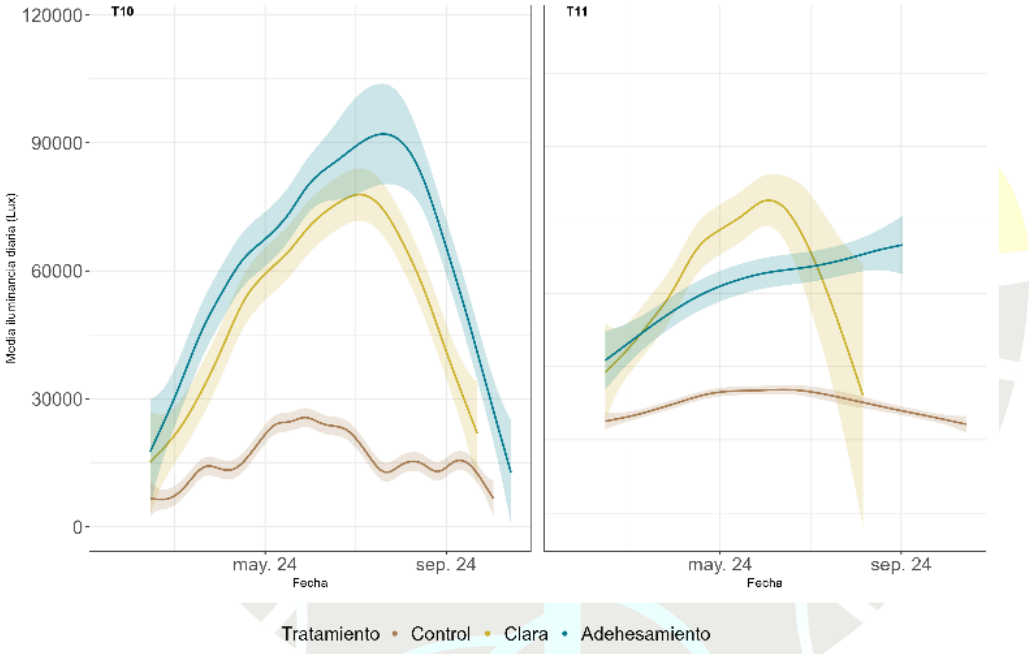


Figura 2: Iluminancia media diaria recibida en el sotobosque (1,5 m.) de los sistemas T10 y T11 (Castilla y León), Los sensores del sistema T9 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos y/o la pérdida del propio sensor.

Tabla 5: Resumen de los resultados de la iluminancia media diaria por triplete y tratamiento. Las letras minúsculas distintas indican medias significativamente distintas entre los tratamientos de un mismo triplete. Para los sistemas T10 y T11 hay sólo una medida de insolación en el tratamiento de adehesamiento. Unidad: luxes.

Triplete	Control	Clara	Adehesamiento-sombra	Adehesamiento-claro
T1	52.380 a	53.607 ab	53.270 b	74.203 c
T4	12.591 a	25.243 b	18.437 c	19.336 c
T5	13.300 a	36.175 b	20.526 d	50.133 c
T6	5.843 a	35.551 b	14.737 d	35.281 c
T7	11.273 a	27.838 b	-	-
T8	20.888 a	30.990 b	46.554 c	
T10	15.556 a	47.268 b	63.571 c	
T11	7.693 a	29.830 b	28.081 c	

2.2. Resultados de temperatura del aire

Las condiciones microclimáticas que se generan dentro de un bosque son diferentes del clima fuera de éste. Esto se debe a la capacidad de amortiguación que genera el dosel arbóreo y arbustivo. Como se ha visto en el apartado previo, las copas de los árboles reducen la insolación directa, disminuyendo la cantidad de energía que llega dentro del bosque y por lo tanto la temperatura máxima. Además, la propia transpiración de la vegetación puede tener efecto de enfriamiento respecto áreas con menos presencia de vegetales o de suelo desnudo. Por otro lado, el dosel también atenúa las temperaturas extremas y el efecto desecante del viento.

En nuestros sistemas de estudio la amplitud térmica diaria (la diferencia entre la temperatura máxima diaria y la mínima) fue en general, mayor en los sistemas adehesados, si bien en algunos sistemas no se observan diferencias entre las zonas de clara y las adehesadas (Tabla 6). En los tripletes de Cataluña (T1-T8) las zonas con tratamiento de clara tuvieron de media 0,78 grados más de amplitud que las zonas control sin tratamiento. Las zonas adehesadas-sombra tuvieron una amplitud de 1,63 grados más respecto las zonas control y en las zonas adehesadas-claro la diferencia con el control fue de 3,32 grados (Figura 3 y 4). En los sistemas agroforestales de Soria (T10 y T11) la diferencia entre los tratamientos fue más acusada: en las zonas de clara hubo una diferencia media de 1,85 grados respecto al control, y la diferencia se amplía hasta 7,35 en el caso de las zonas adehesadas (en dichos sistemas no hubo dos puntos de toma de datos para el tratamiento adehesado).

Durante los meses de verano (junio, julio y agosto) el incremento de la amplitud térmica respecto al control fue de 0,62 grados en las zonas de clara, 1,55 en las zonas de adehesamiento-sombra y 3,01 en las zonas de adehesamiento-claro en Cataluña. Por lo que respecta la temperatura máxima en verano, fue superior al control en 0,71 grados en las zonas de clara, 2,04 en el adehesamiento-sombra y 2,73 en adehesamiento-claro.

En los sistemas de Castilla y León el incremento de la amplitud térmica en verano se amplió hasta 3,98 en las zonas de clara y 5,52 en las zonas de adehesamiento. La temperatura máxima en verano fue de unos 6,10 grados mayor que la control en la zona de adehesamiento, y 3,79 mayor en la zona de clara.

Durante los meses de invierno, las diferencias de amplitud fueron menores, con una amplitud térmica mayor que en el control de 0,70 grados en las zonas donde se realizó tratamiento de clara, 0,83 en las zonas adehesamiento-sombra y 0,48 en adehesamiento-claro.

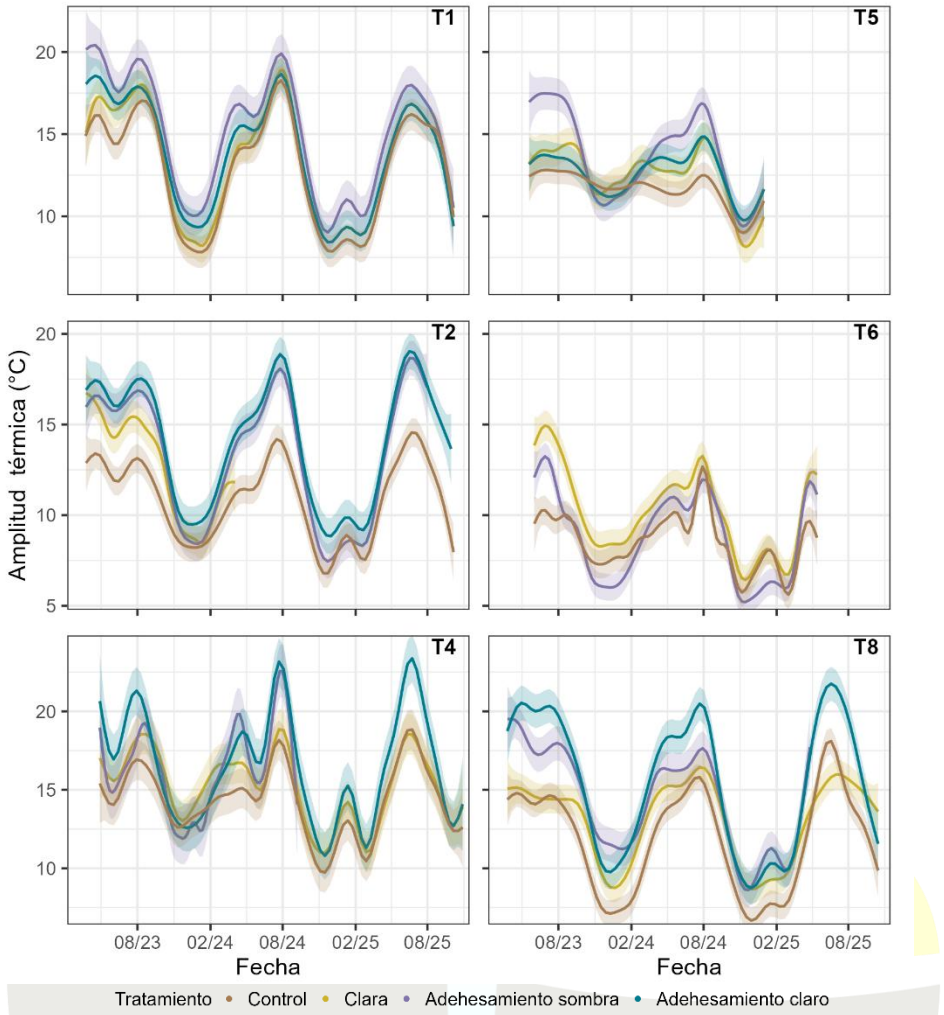


Figura 3: Amplitud térmica media diaria en el sotobosque (1,5 m.) de los sistemas T1, T2, T4, T5, T6 y T8. Los sensores de los sistemas T3 y T7 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos electrónicos y/o la pérdida del propio sensor

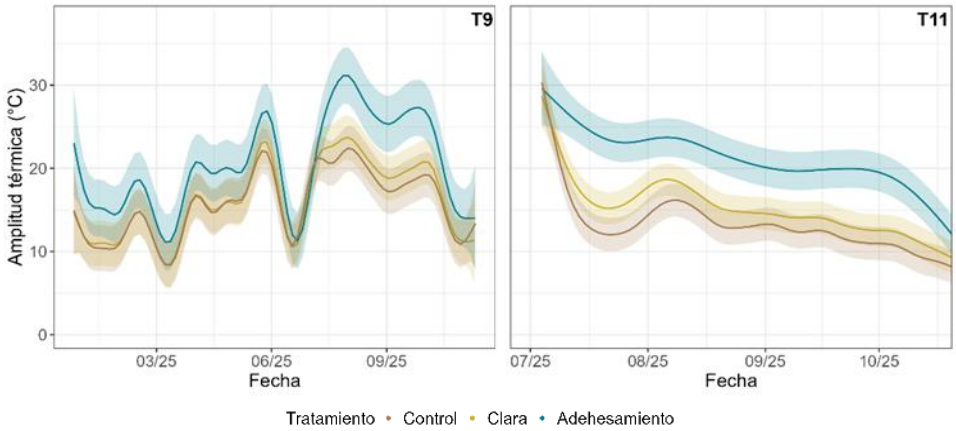


Figura 4: Amplitud térmica media diaria en el sotobosque (1,5 m.) de los sistemas T9 y T11. Los sensores de los sistemas T10 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos y/o la pérdida del propio sensor.

El sotobosque de las parcelas control (no intervenidas) experimentó menores amplitudes térmicas que las parcelas con tratamientos, tanto de clara como de adehesamiento, durante el periodo de seguimiento. En general, los distintos tratamientos difirieron significativamente entre ellos, siendo las zonas de adehesamiento-claro aquellas donde la amplitud térmica es mayor, mientras que las zonas de clara presentan valores de amplitud intermedios entre control y adehesamiento. En el caso de Soria, con un clima más continental que Cataluña, la amplitud térmica y las diferencias entre tratamientos son especialmente marcadas. Se puede concluir, por tanto, que la amplitud térmica es mayor en las zonas menos afectadas por el dosel arbóreo (gradiente: adehesamiento – clara – control) y en las zonas más continentales.

Tabla 6: Resumen de los resultados de la mediana de la amplitud térmica diaria por triplete y tratamiento. Las letras minúsculas distintas indican medianas significativamente distintas entre tratamientos, en un mismo triplete. Para los sistemas T10 y T11 hay sólo una medida de insolación en el tratamiento de adehesamiento.

	Control	Clara	Adehesamiento-sombra	Adehesamiento-claro
T1	*13,3 a*	*14,1 b*	*15,3 c*	*15,8 d*
T2	*11,5 a*	*13,1 b*	*13,4 c*	*14,6 d*
T4	*14,3 a*	*12,9 b*	*16,3 c*	*16,1 d*
T5	*12,0 a*	*12,5 b*	*13,3 c*	*12,8 d*
T6	*8,6 a*	*9,9 b*	*8,4 c*	*16,2 d*
T8	*11,9 a*	*13,6 b*	*14,7 c*	*16,0 d*
T9	*16,0 a*	*16,7 b*	*22,2 c*	
T11	*11,8 a*	*14,8 b*	*20,3 c*	

2.3. Resultados de humedad relativa del aire

La humedad relativa es otra variable que puede verse afectada por el microclima generado por el dosel arbóreo. Es una variable microclimática que tiene un papel relevante en el establecimiento del regenerado y en el funcionamiento de las especies más sensibles a la demanda hídrica, pues regula la cantidad de transpiración. A priori, los bosques densos mantienen una mayor humedad ambiental debido a la transpiración de los árboles y arbustos presentes y a la menor exposición a la insolación, temperaturas altas y viento, gracias al efecto amortiguador del dosel arbóreo. Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados obtenidos en los tripletes AgroForAdapt.

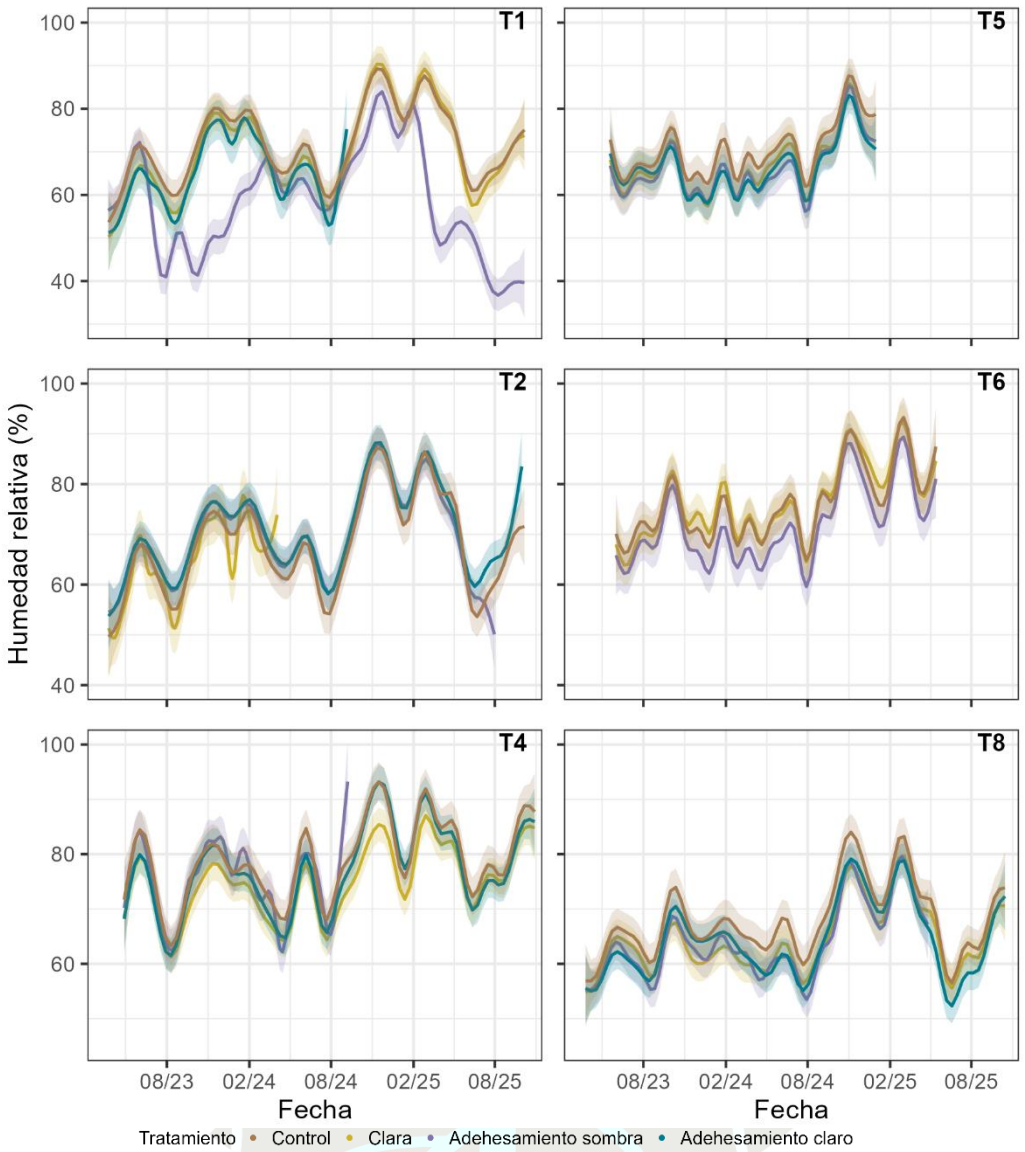


Figura 5: Humedad relativa media diaria en el sotobosque (1,5 m de altura) de los sistemas T1 y T2, T4, T5, T6 y T8. Los sensores de los sistemas T3 y T7 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos electrónicos y/o la pérdida del propio sensor.

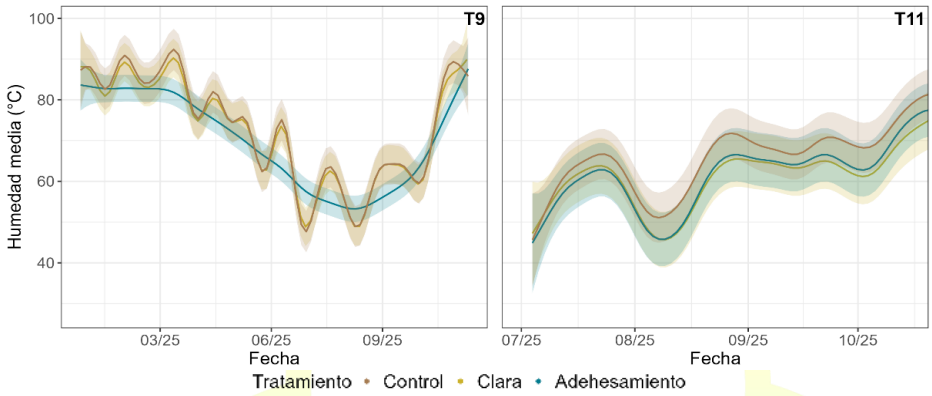


Figura 6: Humedad relativa media diaria en el sotobosque (1,5 m de altura) de los sistemas T9 y T11. Los sensores de los sistemas T10 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos electrónicos y/o la pérdida del propio sensor.

En general el sotobosque de las parcelas control muestra mayores valores de humedad que las parcelas intervenidas. Aunque la magnitud de la respuesta varió entre localidades, los tratamientos generaron una disminución de la humedad del subdosel respecto a las parcelas control, siendo las zonas de adehesamiento los lugares donde la humedad relativa desciende en mayor medida, mientras que las zonas de clara presentan valores intermedios entre control y adehesamiento.

En promedio, en Cataluña, la humedad ambiental se redujo, en comparación con el control, en 3 puntos porcentuales en el tratamiento de clara, en 3,4 puntos porcentuales en adehesamiento-sombra y en 2,8 puntos porcentuales en adehesamiento-claro. En los sistemas de Soria, la diferencia ha sido muy similar, de unos 3 puntos menor en las zonas de clara y 3,4 en las zonas adehesadas.

Sin embargo, en algunos tripletes este patrón no se manifiesta (Tabla 7), seguramente por pequeñas diferencias topográficas entre las parcelas y posibles efectos locales del viento dominante, hecho que condiciona la humedad, sobre todo durante los meses de invierno. Aun así, existe una ligera correlación entre la fracción de cabida cubierta (FCC) y la humedad ambiental (0,55 correlación de Pearson; p = 0,01).

La humedad en invierno fue mayor que en verano. Las diferencias entre tratamientos, en general, se mantuvieron tanto en invierno como en verano (Tabla 8).

Tabla 7: Resumen de los resultados de la mediana de la humedad relativa media diaria (%) por triplete y tratamiento. Las letras minúsculas distintas indican medianas significativamente distintas entre tratamientos, en un mismo triplete. Para los sistemas T10 y T11 hay sólo una medida de insolación en el tratamiento de adehesamiento.

Triplete	Control	Clara	Adehesamiento-sombra	Adehesamiento-claro
T1	68,7 a	66,2 b	59,1 c	64,9 d
T2	65,9 a	64,7 b	68,3 c	68,5 d
T4	75,4 a	71,1 b	74,6 c	73,0 d
T5	71,7 a	68,3 b	67,0 c	68,1 d
T6	71,3 a	68,8 b	68,1 c	66,3 d
T8	68,8 a	64,7 b	64,2 c	65,4 d
T9	73,0 a	72,7 b	-	70,4 c
T11	67,2 a	61,5 b	-	63,0 c

Tabla 8: Resumen de los resultados de la humedad relativa media diaria (%) por triplete y tratamiento en verano e invierno respectivamente. Se muestra las diferencias en puntos porcentuales respecto a los valores de la humedad de las zonas control.

Tratamiento	Humedad media invierno	Diferencia invierno	Humedad media verano	Diferencia media verano
Clara	74,7	-2,71	65,5	-1,75
Adehesamiento-sombra	70,6	-6,83	61,0	-6,29
Adehesamiento-claro	73,6	-3,82	63,8	-3,52
Control	77,5	-	67,3	-

2.4. Resultados de temperatura del suelo

La temperatura del suelo es una variable ambiental que regula las dinámicas del suelo y del sotobosque, y condiciona la evapotranspiración y, por lo tanto, el agua disponible en el suelo. En bosques densos cabe esperar que la temperatura tenga los extremos suavizados, en comparación con las zonas con menos cobertura, debido al efecto atemperador del dosel arbóreo. En las figuras 7 y 8 y en la tabla 8 se presentan los principales resultados de la temperatura del suelo.

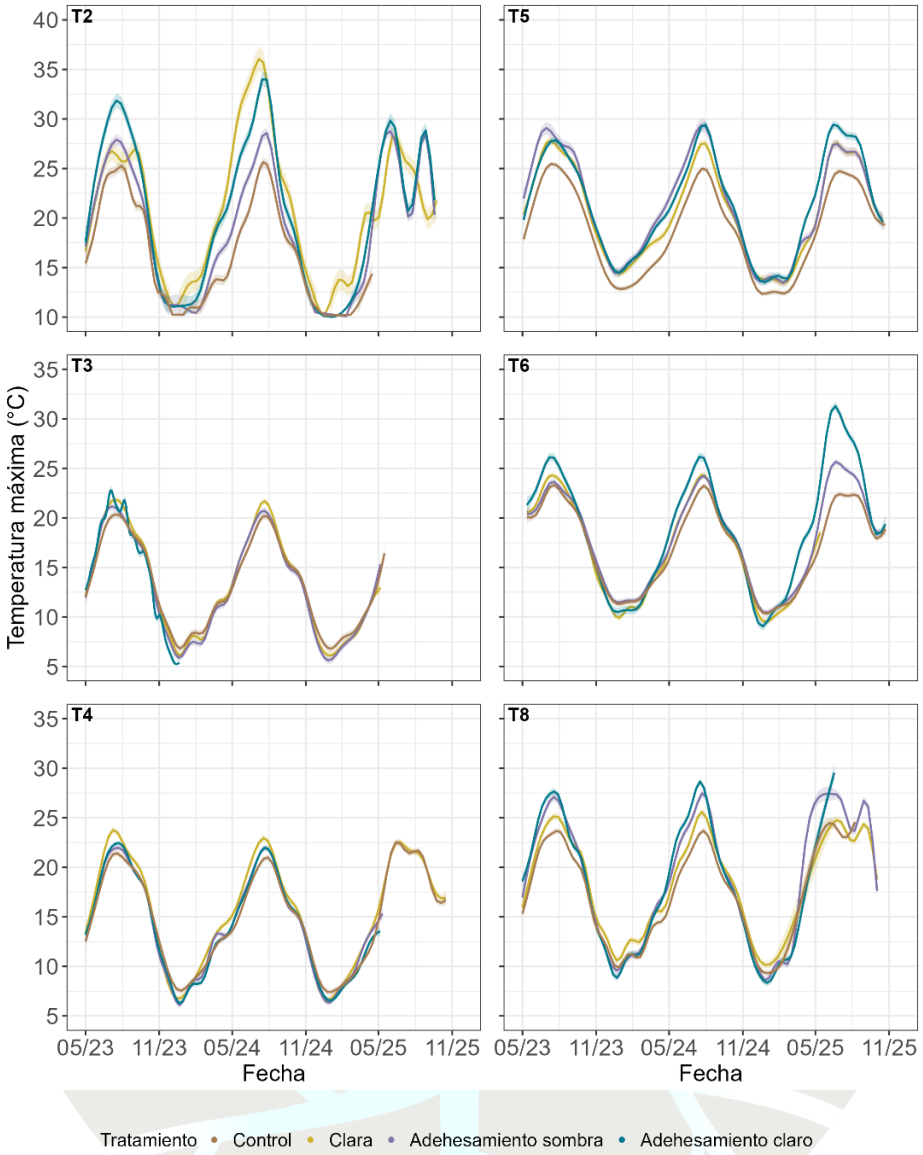


Figura 7: Temperatura máxima diaria en el suelo (10 – 20 cm de profundidad) de los sistemas T2 y T3, T4, T5, T6 y T8. Los sensores de los sistemas T1 y T7 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos y/o la pérdida del propio sensor.

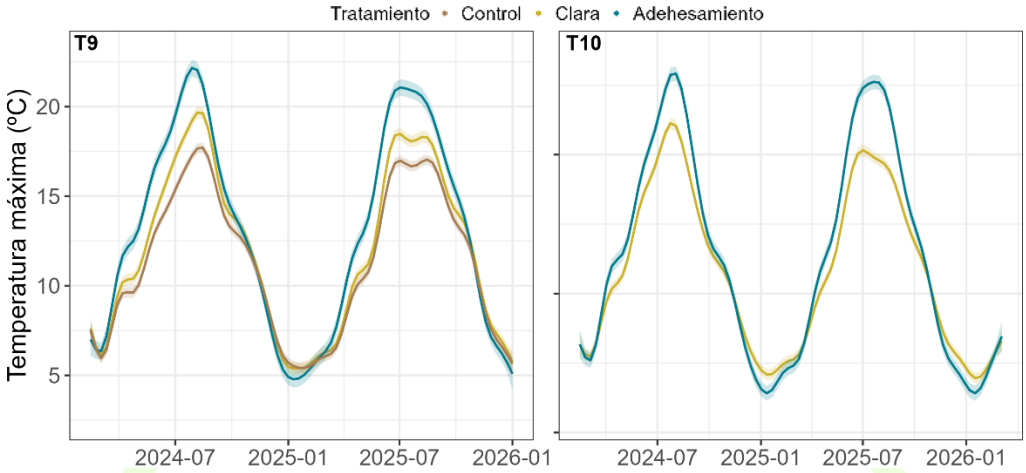


Figura 8: Temperatura máxima diaria en el suelo (10 – 20 cm de profundidad) de los sistemas T9 y T10. Los sensores de los sistemas T1 y T7 tuvieron muchas pérdidas de registros debido a fallos y/o la pérdida del propio sensor.

En general, los tratamientos de clara y adehesamiento dan lugar a temperaturas del suelo más elevadas que las zonas control a lo largo de todo el periodo estudiado (Tabla 10), pero las diferencias se acentúan durante el periodo de verano, momento que llega más insolación en el suelo y se observan mayores diferencias de temperatura entre tratamientos (Figuras 8 y 9, Tabla 11). Las diferencias son más marcadas en los rodales de Soria (clima continental) que en los de Cataluña.

En los rodales de Catalunya, las diferencias de la temperatura máxima durante verano fueron de 3,9 grados en las zonas de adehesamiento sin influencia del árbol (claro) mientras que en las zonas de clara la diferencia fue de 2,4 grados. La diferencia en invierno, absoluta y porcentual fue más baja y no existen diferencias marcadas entre tratamientos, 0,8 grados más en las zonas de adehesamiento de claro y 0,7 en las zonas de adehesamiento de claro (sin influencia de la sombra).

Tabla 10: Resumen de los resultados de la temperatura media del suelo por triplete y tratamiento. Las letras minúsculas distintas indican medias significativamente distintas entre tratamientos, a nivel de cada triplete. Para los sistemas T9 y T10 hay sólo una medida de insolación en el tratamiento de adehesamiento.

Triplete	Control	Clara	Adehesamiento-sombra	Adehesamiento-claro
T2	15,6 a	20,9 b	18,5 c	20,3 d
T3	13,2 a	13,3 b	12,9 b	15,2 c
T4	15,0 a	15,6 b	14,0 c	14,0 d
T5	19,1 a	20,7 b	21,7 c	21,6 d
T6	17,1 a	16,5 b	17,9 c	18,9 d
T8	17,0 a	18,5 bc	18,7 b	17,6 c
T9	10,0 a	11,5 b	12,6 c	
T10	-	11,6 a	12,7 a	

Tabla 11: Resumen de los resultados de la Temperatura máxima diaria por triplete y tratamiento en verano e invierno respectivamente. Se muestra la diferencia en grados centígrados y porcentaje para los periodos de verano e invierno.

Tratamiento	Tmax diaria verano	Diferencia Tmax verano		Tmin diaria invierno	Diferencia Tmin invierno	
Clara	24,0 ºC	2,4 ºC	11,1%	11,1 ºC	0,7 ºC	6,7%
Adehes.-Sombra	23,9 ºC	2,3 ºC	10,6%	10,6 ºC	0,2 ºC	1,9%
Aadehes.-Claro	25,5 ºC	3,9 ºC	18,1%	11,2 ºC	0,8 ºC	7,7%
Control	21,6 ºC	-	-	10,4 ºC	-	-

2.5. Resultados de humedad del suelo

La humedad del suelo es el principal reservorio hídrico disponible para la vegetación y es esencial para comprender el funcionamiento ecohidrológico de los ecosistemas forestales. El seguimiento temporal del contenido de humedad del suelo permite observar los procesos de recarga, que se producen tras episodios de precipitación, cuando el agua se infiltra y se almacena en los distintos horizontes del suelo. Esta recarga depende de factores como la intensidad de la lluvia, la textura del suelo, la cobertura vegetal y la estructura del dosel.

En las zonas donde se han aplicado tratamientos selvícolas, se observa una mayor disponibilidad de agua en el suelo en comparación con las áreas control (Tabla 8, Figura 8). De media el tratamiento con más humedad en el suelo es el adehesamiento-sombra, seguida de la zona de adehesamiento-claro. En verano las diferencias en humedad con respecto a la control aumentaron en la zona de clara, mientras que en invierno estas diferencias fueron menos marcadas.

Tabla 8: Humedad gravimétrica media (m^3/m^3) anual, durante el verano y el invierno, para cada tratamiento en el triplete T4. Se muestra también la diferencia porcentual respecto la humedad de la parcela control.

Tratamiento	Humedad media	Diferencia media	Humedad media verano	Diferencia verano	Humedad media invierno	Diferencia invierno
Control	0,236	-	0,219	-	0,242	-
Clara	0,269	13,7%	0,273	24,7%	0,261	7,85%
Adehes.-sombra	0,311	31,6%	0,298	36,5%	0,327	35,3%
Adehes.-claro	0,278	17,8%	0,259	18,5%	0,290	19,8%

Este incremento se debe principalmente a la reducción de la competencia entre individuos tras las cortas, lo que disminuye la demanda evapotranspirativa del sistema. Como consecuencia, una mayor proporción del agua infiltrada permanece disponible en el suelo. Este efecto resulta clave para entender la dinámica hídrica del sistema y para evaluar el papel de la gestión forestal en la mitigación del estrés hídrico en un contexto de cambio climático. El tratamiento con mayor humedad en el suelo es el de adehesamiento-sombra (bajo la copa del árbol), debido a la protección que ejerce la copa de la insolación directa.

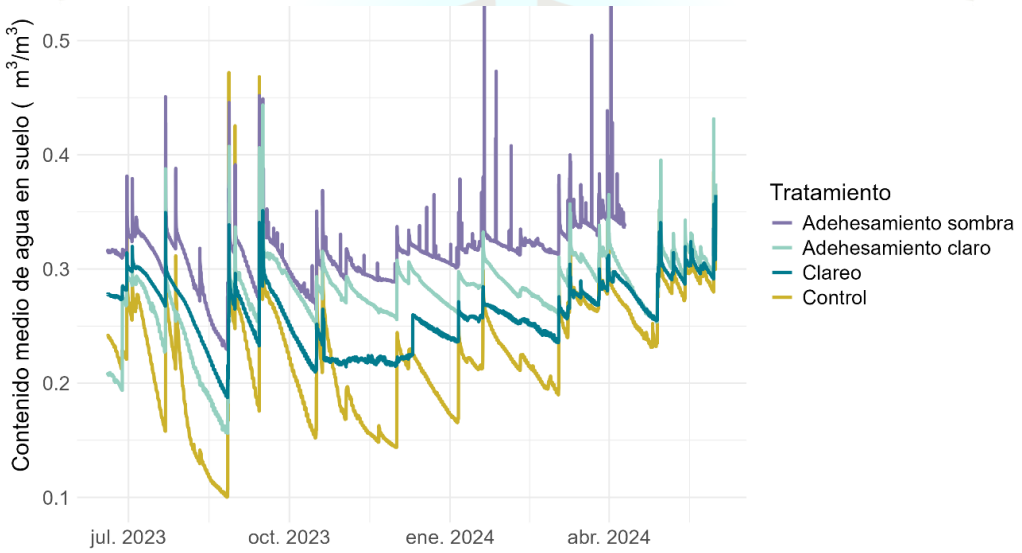


Figura 10: Humedad gravimétrica media (m^3/m^3) anual, durante el verano y de invierno para cada tipo de tratamiento en el triplete T4. Se muestra también la diferencia porcentual respecto la humedad de la parcela control.

2.6 Discusión conjunta de los resultados de luz, temperatura y humedad

Los tratamientos selvícolas aplicados en los rodales demostrativos han generado cambios en el microclima en comparación con las zonas control. Estos cambios están estrechamente relacionados con la intensidad de las intervenciones. En particular, el adehesamiento produce modificaciones significativamente mayores que las claras.

Una mayor intensidad de corta:

· incrementa la insolación en el subdosel y el sotobosque. En los sistemas adehesados, este efecto no es homogéneo, ya que existen diferencias marcadas entre las zonas de claro (adehesamiento-claro) y las situadas bajo la copa de los árboles (adehesamiento-sombra). Esta heterogeneidad genera un mosaico de condiciones microclimáticas.

· genera una mayor amplitud térmica, con temperaturas más bajas en invierno y más elevadas en verano.

· disminuye la humedad relativa

· incrementa la temperatura del suelo, especialmente durante el periodo estival.

· incrementa la humedad del suelo, especialmente en la zona bajo las copas de los árboles (adehesamiento-sombra). Este efecto contrasta con el resto de variables, que harían intuir una menor humedad edáfica, cuando el efecto es el opuesto. Este efecto es debido a las complejas relaciones entre el estrato vegetal y el microclima: en el rodal donde se ha estudiado la humedad del suelo, la competencia vegetal (densidad arbolada y arbustiva) parece tener un impacto mayor sobre la humedad del suelo que el microclima (humedad relativa, insolación, temperatura).

Estos cambios microclimáticos afectan al nicho ecológico para las especies del sotobosque y el regenerado del estrato arbóreo. En función de la intensidad de corta, se pueden generar condiciones particularmente favorables para especies adaptadas al gradiente de luz, amplitud térmica, humedad relativa y edáfica.

En el contexto del cambio climático, el aumento de las temperaturas y de la intensidad y recurrencia de episodios extremos, parece recomendable intercalar un gradiente de condiciones (densidad arbolada y arbustiva) para mantener una diversidad de nichos ecológicos, tanto para el ganado como para los recursos forrajeros del sotobosque, incorporando en la gestión las complejas relaciones entre la atmósfera, el suelo y la vegetación.

3. Estudio del balance hídrico (medfate)

3.1. Metodología

El balance hídrico es un factor crítico para la producción forestal y pastoral en el mediterráneo. Con el fin de analizar el efecto de la gestión forestal sobre el balance hídrico del rodal, y complementar la información medida empíricamente de humedad del suelo en el triplete T4, se utilizó *medfate*, un paquete de simulación en R diseñado para modelizar el balance hídrico en ecosistemas forestales (De Cáceres et al., 2015). Las simulaciones realizadas con *medfate* integran información sobre la estructura y composición de la vegetación, junto con rasgos fisiológicos y fenológicos de las especies, información del suelo, datos meteorológicos diarios y características del sitio.

La vegetación se caracterizó a partir de los inventarios dasométricos y de sotobosque (acción D2.2) considerando todos los estratos presentes en el rodal: arbóreo, arbustivo y herbáceo. Para el estrato arbóreo se utilizaron variables como el diámetro normal, la altura total y la altura a base de copa por especie derivados de los inventarios dasométricos, junto con otros parámetros fisiológicos obtenidos de la base de datos incorporada en el paquete *medfate*. Dado que la altura a base de copa se había inventariado en solo 5 árboles por parcela, se utilizaron alometrías regionales (Krsnik et al., 2020) para inferir la altura a base copa en aquellos árboles donde no se tenían datos. A partir de esta información se calculó el área basimétrica y la densidad de árboles por especie en el rodal. El estrato arbustivo se caracterizó mediante la altura y el porcentaje de recubrimiento por especie derivados de los transectos de sotobosque, mientras que el estrato herbáceo se caracterizó a partir del recubrimiento y la altura de la vegetación herbácea inventariados en los mismos transectos.

Para caracterizar el suelo se utilizó la base de datos global SoilGrids (https://soilgrids.org). Los parámetros necesarios para simular el balance hídrico utilizando *medfate* incluyen la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la densidad aparente y el porcentaje de rocas.

A partir de los datos de vegetación derivados de los inventarios y de los parámetros fisiológicos y fenológicos asociados, *medfate* estima el índice de área foliar (LAI) por especie utilizando ecuaciones alométricas regionales. El LAI es una variable clave para la simulación del balance hídrico.

Con el objetivo de comparar el balance hídrico no solo según la gestión forestal sino también según las condiciones climáticas del año, se simuló el balance hídrico para los años más secos y más húmedos de entre 2010 y 2025, seleccionados como los años con un percentil menor al 25º y mayor al 75º del índice SPEI de la serie climática (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). El índice SPEI se calculó a partir de datos meteorológicos (precipitación y evapotranspiración potencial) obtenidos de la red de estaciones del SMC y de AEMET, interpolados a los rodales de estudio mediate el paquete de R *meteoland* (De Cáceres *et al.*, 2018). Así, el balance hídrico por rodal se simuló en un total de 4 años secos (SPEI < -3.8: 2012, 2017, 2022, 2023) y 4 años húmedos (SPEI > 5.0: 2010, 2014, 2018, 2020). Los datos meteorológicos necesarios para simular el balance hídrico incluyen datos diarios de temperatura mínima y máxima, humedad relativa mínima y máxima, precipitación, radiación solar y velocidad del viento.

Para una descripción detallada del funcionamiento del modelo *medfate* y de la simulación del balance hídrico, se recomienda consultar su libro de referencia: https://emf-creaf.github.io/medfatebook/index.html.

De la gran variedad de indicadores de balance hídrico que *medfate* proporciona, se han escogido el contenido relativo de agua extraíble en suelo y la cantidad de agua azul por rodal.

El contenido relativo de agua extraíble representa la ratio entre la cantidad de agua disponible en suelo y la cantidad máxima de agua extraíble, y varía entre 0 y 1, donde 1 corresponde a la capacidad de campo (contenido de agua en el suelo cuando éste se satura) y 0 al punto de marchitez permanente (potencial hídrico del suelo más negativo a partir del cual las hojas de las plantas no recobran su turgencia). Se presenta el contenido relativo de agua extraíble de las capas más superficiales del suelo, ya que es en estas capas donde se concentra la mayor proporción de raíces finas.

El agua azul es un indicador de la provisión de agua del rodal como servicio ecosistémico. Se refiere al agua que escurre por superficie o percola a través del suelo hacia las aguas subterráneas, contribuyendo a aumentar las reservas de agua en ríos, acuíferos y otras masas de agua. Así, valores altos de agua azul indican una menor transpiración por la vegetación y menor evaporación del suelo y, por tanto, una mayor recarga de acuíferos.

No se muestran los resultados de T07 Adehesamiento, ya que en este rodal no se aplicó dicho tratamiento, como se ha mencionado previamente.

3.2 Resultados y discusión del balance hídrico

En general, los adehesamientos dan lugar a una mayor cantidad de agua extraíble en el suelo y también de agua azul justo después de las intervenciones, en comparación con las claras y el control. Esta diferencia se va atenuando con el paso del tiempo, de una manera más rápida que en el caso de la clara, ya que la recuperación de la vegetación es más rápida en el primer caso (Figuras 11 a 14). En concreto, en los rodales adehesados el incremento de agua disponible inmediatamente después de los tratamientos es del 35%, reduciéndose al 12% dos años después. De forma similar, el agua azul experimenta un aumento notable justo después de la intervención (+207%), pero este incremento disminuye hasta el +47% pasados dos años.

En los bosques de pinos, la diferencia de agua disponible y agua azul respecto al control es significativa en los escenarios “seco” y “húmedo” tanto en el tratamiento de adehesamiento como de clara. Estas diferencias tienden a reducirse durante el último año de seguimiento debido al crecimiento de la masa. No se observan diferencias relevantes entre claras y adehesamientos en la cantidad de agua disponible para los árboles, si bien si se observa que el agua azul es mayor en los rodales adehesados. Cabe destacar que, en años húmedos, las diferencias entre tratamientos y control son menores, mientras que en años secos el incremento de la disponibilidad hídrica gracias a los tratamientos es más pronunciado (Figura 12).

En el caso de los bosques de quercíneas, la disponibilidad de agua respecto al control solo presenta diferencias significativas durante el primer año tras el tratamiento, y únicamente en la parcela adehesadas. Sin embargo, durante el último año de seguimiento (3 años después de las intervenciones) tanto el agua disponible como el agua azul en zonas adehesadas ya no muestran diferencias con las zonas control. Las claras en esta formación arbolada no dieron lugar a una mayor disponibilidad de agua en el suelo respecto a las zonas control, si bien sí aumentan el agua azul un año después de los tratamientos. En comparación con los pinares, las diferencias entre escenarios seco y húmedo son menos pronunciadas, salvo en los rodales adehesados, donde el contraste con el control es mayor en años secos que en húmedos. Se observa la misma tendencia con el agua azul, donde alcanza valores más elevados en años húmedos en estos rodales (Figura 14).

Estos resultados pueden explicarse por la elevada capacidad de rebrote de las quercíneas, que dan lugar a una rápida recuperación de la vegetación tras los tratamientos selvícolas, tal como se refleja en la recuperación tanto en la cobertura como en la biomasa arbustiva observada durante el último año de seguimiento. En comparación, los pinares muestran una respuesta más marcada de las cortas sobre la disponibilidad de agua y el agua azul. Esto probablemente se debe no solo a diferencias en la estructura de los rodales, sino también a la mayor profundidad del sistema radicular de las quercíneas. Estos resultados subrayan la efectividad de las cortas para reducir el estrés hídrico en los bosques de coníferas. El potencial efecto positivo a medio plazo en los bosques dominados por quercíneas es menor, aunque su resiliencia frente a episodios de sequía es mayor.

En cuanto a las diferencias entre bioclimas, donde T1, T5, T6 y T8 corresponden a clima mediterráneo seco; T3, T4 y T7 a mediterráneo subhúmedo; y T9, T10 y T11 a supramediterráneo, no se observan patrones claros que relacionen el tipo de clima con la disponibilidad de agua o el agua azul.

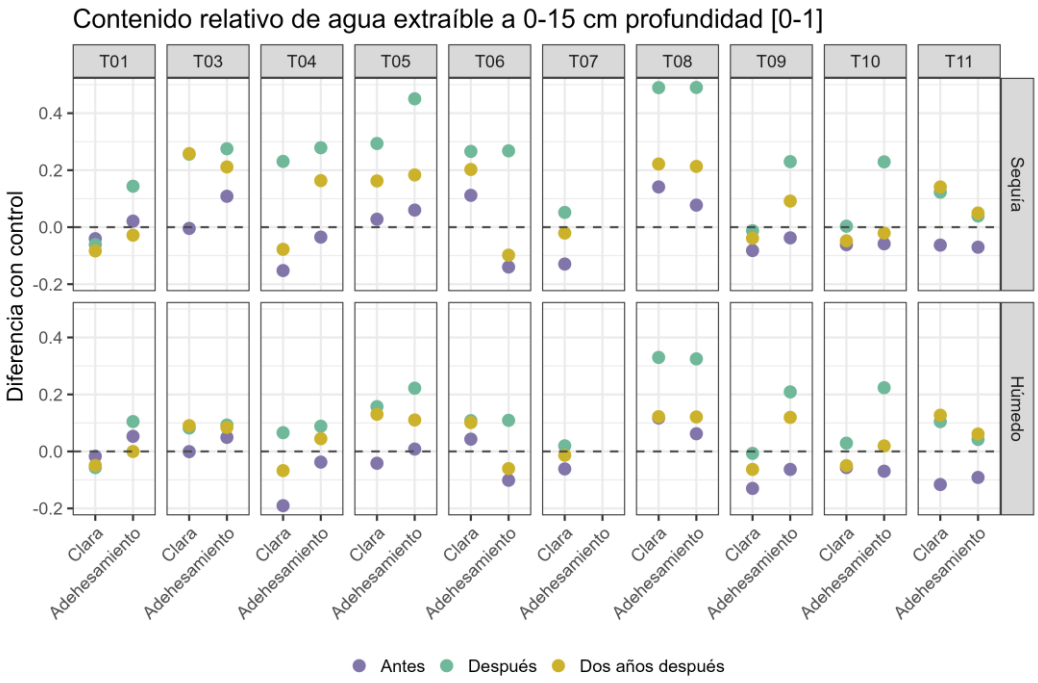


Figura 1. Diferencia entre el contenido de agua extraíble relativo simulado en las capas superficiales del suelo (0-15 cm) en los rodales tratados (clara, adehesamiento) y los rodales control según año seco/húmedo en cada rodal. Valores por encima de la línea discontinua horizontal indican incremento en el contenido de agua extraíble relativo respeto al tratamiento control; por debajo, indican una reducción del contenido de agua extraíble respecto al tratamiento control.

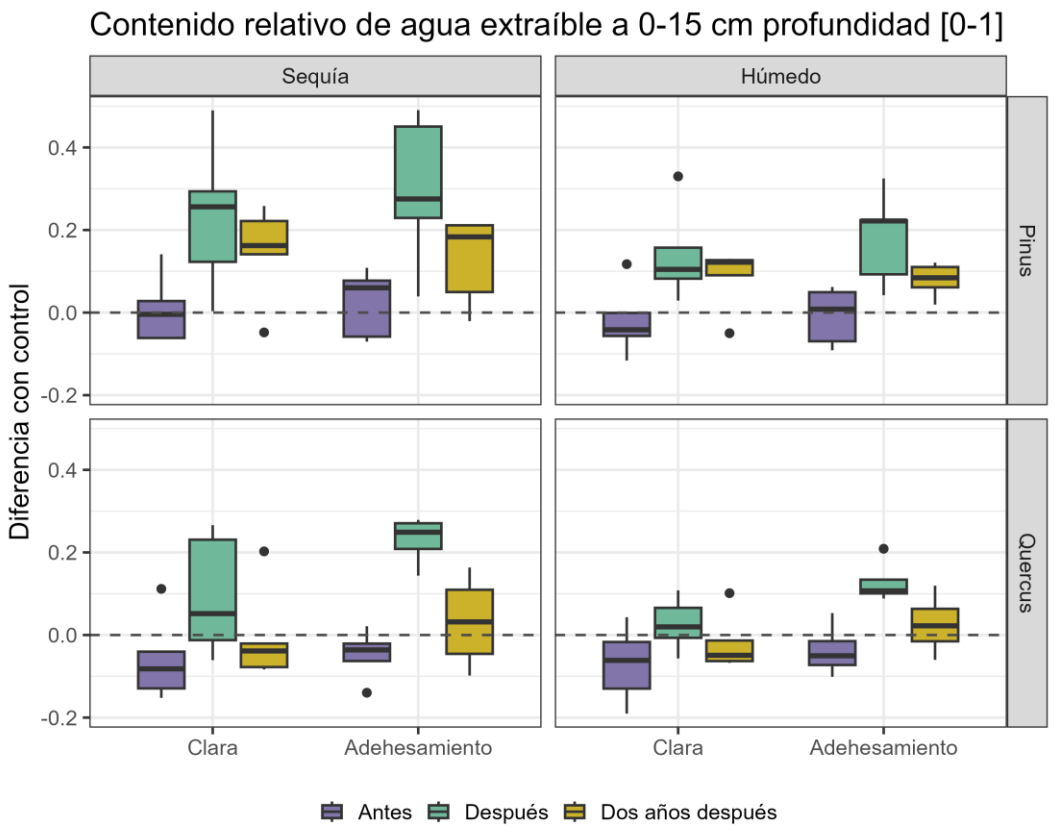


Figura 2. Diferencia entre el contenido de agua extraíble relativo simulado en las capas superficiales del suelo (0-15 cm) en los rodales tratados (clara, adehesamiento) y los rodales control según tipo de masa forestal y año seco/húmedo. Valores por encima de la línea discontinua horizontal indican incremento en el contenido de agua extraíble relativo respeto el control, por debajo indican reducción. Los rodales de *Pinus* corresponden a T3, T5, T8, T10 y T11; los rodales de *Quercus* corresponden a T1, T4, T6, T7 y T9.

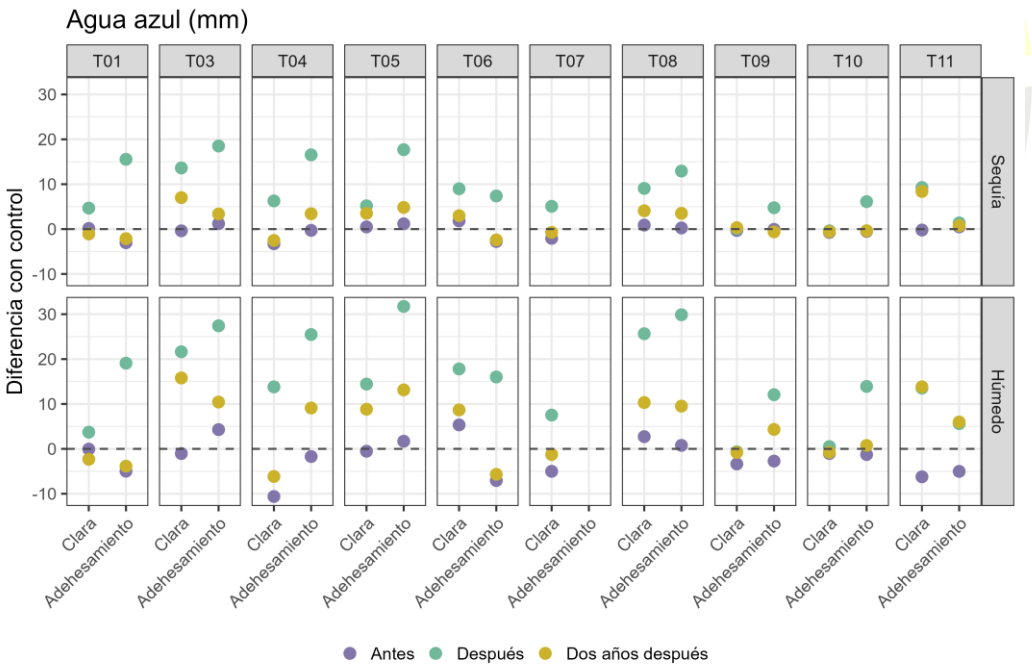


Figura 3. Diferencia entre el agua azul simulada en los rodales tratados (clara, adehesamiento) y los rodales control según año seco/húmedo por rodal. Valores por encima de la línea discontinua horizontal indican un incremento en agua azul respeto el control, por debajo indican reducción.

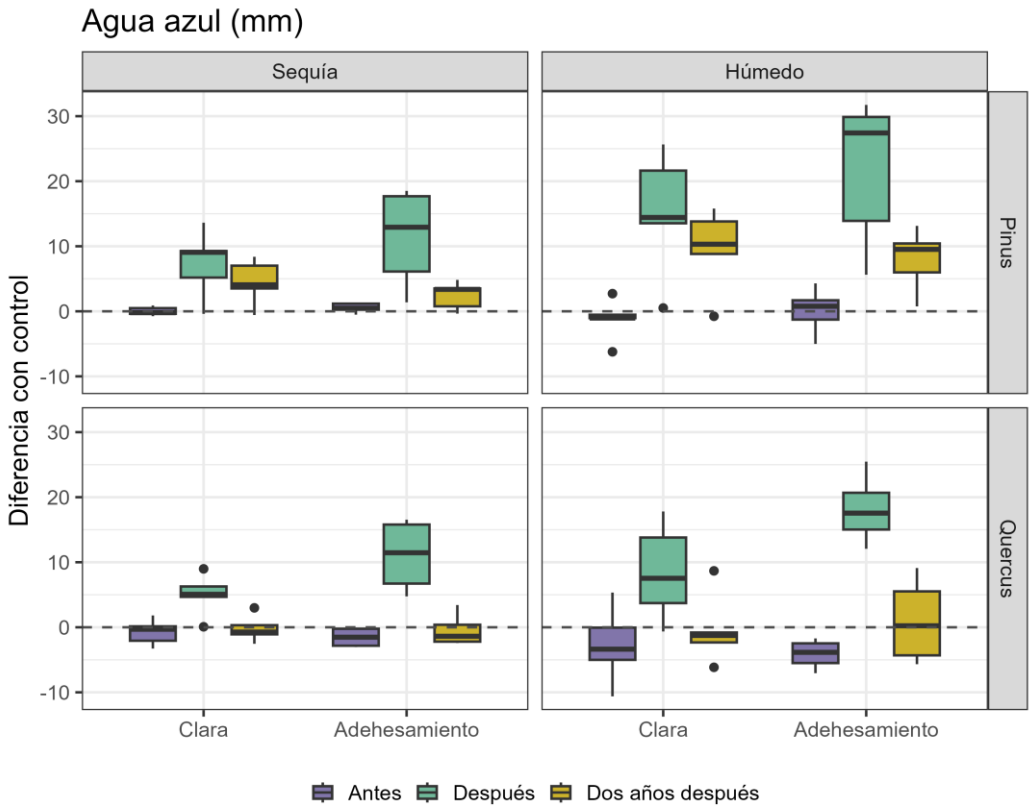


Figura 4. Diferencia entre el agua azul simulada en los rodales tratados (clara, adehesamiento) y los rodales control según tipo de masa forestal y año seco/húmedo. Valores por encima de la línea discontinua horizontal indican un incremento en agua azul respeto el control, por debajo indican reducción. Los rodales de *Pinus* corresponden a T3, T5, T8, T10 y T11; los rodales de *Quercus* corresponden a T1, T4, T6, T7 y T9.

4. Análisis de los índices de vegetación (teledetección satelital)

4.1. Introducción

Este estudio evalúa el impacto de los tres tipos de gestión forestal (clara, adehesamiento y control) en la dinámica de la vegetación de los nueve tripletes donde se ha realizado el seguimiento avanzado con al menos dos o tres años de seguimiento post-intervención. El análisis se basa en la comparación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a lo largo del tiempo a través de imágenes satelitales de alta resolución. El objetivo principal es comparar el NDVI en cada triplete para determinar el efecto de las intervenciones forestales.

Se han considerado imágenes entre los años 2022 (antes de los tratamientos) y 2025 (última fecha disponible para disponer del máximo de años), restringidas al periodo de abril a agosto, coincidente con la fase principal de actividad vegetativa.

Los polígonos de estudio se definieron como círculos de 10 m de radio, centrados en las coordenadas del centro de la parcela.

4.2. Área de estudio

En la Tabla 9 se recoge la localización detallada de las parcelas incluidas en el estudio. Para cada municipio se indica el municipio, triplete, rodal, código de parcela experimental (P1: clara, P2: adehesamiento; PC: control), sus coordenadas planas (Coord X, Coord Y), el identificador del triplete experimental y el periodo en que se realizaron los tratamientos selvícolas. Esta información sirve de referencia espacial para la extracción posterior de los valores de NDVI en cada parcela.

Tabla 9. Localización e información de las parcelas de estudio. P1: clara; P2: adehesamiento; PC: control

Municipio	Triplete	Rodal	Tratamiento	Coord X	Coord Y	Fecha tratamiento
Muriel viejo	T9	4U	Clara	507074	4624981	Octubre 2022
			Adehesam.	507056	4625021	
			Control	507051	4625073	
Navaleno-Soria (Pinar grande)	T10	4E	Clara	504195	4631453	Octubre 2022
		4E	Adehesam.	504150	4631527	
		4E	Control	504133	4631555	
La Póveda	T11	3.2D	Clara	541624	4654283	Octubre 2023
		3.2D	Adehesam.	541670	4654361	
		3.2D	Control	541764	4654303	
Sant Climent de Llobregat	T5	3.2A Solana	Clara	413416	4575793	Octubre 2023
		3.2A Solana	Adehesam.	413339	4575819	
		Control Solana	Control	413396	4575740	
	T6	4B Obaga	Clara	412924	4575148	
		3.2A Obaga	Adehesam.	412900	4575190	
		Control Obaga	Control	412880	4575162	
Sant Mateu de Bages	T1	4K	Clara	384674	4626393	Diciembre 2022-enero 2023
		3.2G	Adehesam.	384627	4626457	
		4K_3.2G	Control	384578	4626321	
	T2	4J	Clara	385428	4625594	
		3.2G	Adehesam.	385427	4625718	
		4J_3.2G	Control	385434	4625666	
Sora	T3	4M	Clara	432277	4664162	Febrero-marzo 2023
		4M	Adehesam.	432366	4664148	
		4M	Control	432342	4664292	
	T4	3.2F	Clara	432326	4663696	
		3.2F	Adehesam.	432321	4663639	
		3.2F	Control	432354	4663792	
Aiguamúrcia	T8	4A	Clara	363912	4578500	Diciembre 2022-enero 2023
		4A	Adehesam.	363930	4578554	
		4A	Control	363917	4578598	
Sant Celoni	T7	4R	Clara	459759	4612985	Febrero-marzo 2023
		4R	Desbroce.	459766	4613082	
		4R	Control	459621	4613119	

4.3. Investigación de imágenes

4.3.1. Elección del proveedor

El proceso de selección de imágenes satelitales para este estudio no fue inmediato, sino el resultado de varias pruebas hasta encontrar una solución técnica y económicamente viable. El tamaño reducido de las parcelas, el presupuesto y la necesidad de una serie temporal relativamente densa condicionaron de manera importante las opciones de proveedores y licencias.

En una primera fase se exploró la posibilidad de trabajar con **PlanetScope (3 m)**, aprovechando las licencias ya disponibles en el entorno de trabajo. A nivel de catálogo, PlanetScope resultaba muy atractivo: el estudio de Planet Explorer y el plugin de Planet para QGIS mostró que había una cobertura amplia y frecuente sobre nuestras áreas de estudio para los años y meses de interés. Sin embargo, al pasar de la visualización al acceso real a los datos aparecieron las primeras limitaciones. Se desarrollaron scripts en Google Colab para intentar descargar las imágenes, demostrándose que las licencias disponibles solo permitían **listar y visualizar** productos, pero **no autorizaban la descarga** de las escenas PlanetScope necesarias para calcular el NDVI y construir series temporales propias. Paralelamente se revisaron otras modalidades de acceso de Planet, incluyendo la colección **Analysis-Ready PlanetScope**. Aunque estas colecciones están pensadas precisamente para análisis temporales, su cobertura en España se limita a unas pocas áreas piloto (por ejemplo, en el País Vasco), fuera de nuestra área de estudio.

Ante estas limitaciones se abrió una segunda línea de búsqueda centrada en **proveedores alternativos de muy alta resolución**. Se exploró el acceso al archivo de misiones comerciales a través de la **ESA Third Party Missions (TPM)**. Se consultaron los catálogos y se realizó una consulta formal para aclarar condiciones y requisitos de acceso. Aunque, en principio, el archivo de WorldView está disponible de forma abierta y gratuita para instituciones elegibles, las escenas disponibles no incluían nuestras parcelas. La opción de solicitar nuevas adquisiciones se descartó también, ya que solo habría proporcionado imágenes futuras puntuales y no permitía reconstruir la serie histórica 2022–2025 que requiere este estudio.

En paralelo se consultaron distribuidores comerciales como Maxar y Apollo Mapping. A partir de sus tarifas de referencia se estimaron los costes de adquisición de datos de archivo WorldView y PlanetScope para nuestras fechas. Aunque los precios por km² pueden ser razonables para proyectos con áreas extensas, en nuestro caso el problema eran los mínimos de pedido: áreas mínimas de 25 km² para WorldView y de 250 km² por año para PlanetScope, frente a una superficie real de proyecto del orden de unos pocos miles de metros cuadrados. Además, la propia empresa confirmaba que no se podía garantizar la disponibilidad de imágenes de alta resolución para todos los meses y años solicitados. Esta combinación de coste elevado, mínimos desproporcionados e incertidumbre temporal hizo que también se descartara esta vía.

La solución viable llegó en una tercera fase, a través de la plataforma **UP42**. La primera opción de acceso a las imágenes consistía en la compra directa de las imágenes. El modelo de facturación era más razonable que otros proveedores, sin embargo, UP42 también ofrecía la posibilidad de enviar una propuesta solicitando la aprobación de un presupuesto en créditos para la adquisición de imágenes a través del programa **ESA Network of Resources (NoR)**. Se preparó una propuesta detallada describiendo el contexto del proyecto, la naturaleza de las parcelas de estudio y las necesidades de archivo, la cual fue finalmente aprobada; concediendo un presupuesto en créditos suficiente para cubrir la adquisición de las escenas necesarias.

4.3.2. Imágenes seleccionadas

Para cada una de las zonas de estudio se realizó un análisis sistemático de las imágenes disponibles de los distintos satélites. Los metadatos y resultados de esta exploración sirvieron como base para la selección final (Tabla 10). Se priorizaron aquellas combinaciones de sensor y fecha que permitieran construir series temporales lo más homogéneas posible por parcela y zona, evitando mezclar demasiados satélites distintos cuando ello solo añadía una fecha aislada. En segundo lugar, se seleccionaron aquellas imágenes con menor nubosidad.

Tabla 10. Fecha de las imágenes seleccionadas finalmente para cada zona de estudio

Año	Mes	Soria			Tarragona	Barcelona			
		Muriel	Poveda	Navaleno-Soria	Aiguamurcia	Sora	St. Celoni	St. Climent	St. Mateu
2022	Abril							01/04	
	Mayo	11/05		11/05				18/05	
				31/05	27/05				26/05
	Junio	13/06		13/06		15/06			18/06
	Julio			01/07				22/07	
	Agosto				07/08		05/08		
2023	Abril				25/04		08/04		
	Mayo				29/05				
	Junio								
	Julio			02/07	02/07				
		20/07	20/07	20/07			19/07	13/07	
	Agosto	01/08		01/08		05/08		01/08	05/08
		08/08			17/08			23/08	
2024	Abril				14/04			16/04	14/04
	Mayo							28/05	31/05
	Junio								
	Julio	24/07				08/07			
		25/07	25/07	25/07		15/07	23/07	31/07	15/07
	Agosto	15/08					03/08	03/08	08/04
2025	Abril								
	Mayo	28/05		31/05	26/05				30/05
	Junio	16/06	16/06	16/06		18/06	06/06	16/06	18/06
	Julio						14/07	14/07	
	Agosto				27/08			05/08	

En las parcelas de Cataluña (Aiguamúrcia, Sora, Sant Celoni, Sant Climent y Sant Mateu) se dispone, en general, de un **número mayor de fechas por campaña**, incluyendo varias adquisiciones en verano (julio–agosto). En Soria (Muriel, La Póveda y Navaleno-Soria), en cambio, buena parte de las imágenes se concentran en **mayo–junio**. Esta distribución desigual de fechas debe tenerse en cuenta a la hora de interpretar la amplitud aparente de las fluctuaciones de NDVI entre regiones.

El resultado de este proceso es un conjunto de imágenes de muy alta resolución procedentes de distintos sensores: *Pléiades* para Aiguamurcia, *WorldView* para Sant Celoni y Sant Climent, y *SPOT* para los rodales situados en la provincia de Soria, Sant Mateu de Bages y Sora.

Tabla 11. Características espectrales y espaciales de los sensores considerados

Programa	Resolución espacial (m)	Banda espectral	Rango espectral (nm)
SPOT (SPOT-6, SPOT-7)	6	Rojo	624 - 694
		Verde	527 - 587
		Azul	454 - 519
		Infrarrojo cercano	756 - 880
WorldView -2	2	Azul	450 - 510
		Verde	510 - 580
		Amarillo	
		Rojo	630 - 690
		Borde rojo	
		Infrarrojo cercano 1	770 -895
		Infrarrojo cercano 2	860 -1040
WorldView -3 *WorldView Legion*	1,20	Azul	450 - 510
		Verde	510 - 580
		Amarillo	
		Rojo	630 - 690
		Borde rojo 1, Borde rojo 2	
		Infrarrojo cercano 1	770 -895
Pleiades	2	Rojo	590 - 710
		Verde	500 - 620
		Azul	430 - 550
		Infrarrojo cercano	740 - 940
Pleiades Neo	1,20	Azul	450 - 520
		Verde	530 - 590
		Rojo	620 - 690
		Infrarrojo cercano	770 - 880
		Borde rojo	700 - 750
		Azul profundo	400 - 450

4.3.3. Cálculo de NDVI

Sobre las imágenes descargadas se procedió al **cálculo del NDVI**. En los distintos sensores, se identificaron las bandas correspondientes al rojo (R) y al infrarrojo cercano (NIR), trabajando siempre con productos de reflectancia. El NDVI se calculó mediante la expresión clásica:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

El resultado de este cálculo es, para cada fecha, una imagen monobanda en la que los valores oscilan entre –1 y 1, con valores más próximos a 1 asociados en general a vegetación más vigorosa. Estas imágenes de NDVI se organizaron en una estructura temporal por zonas (Soria y Cataluña), de manera que cada escena pudiera vincularse fácilmente con su fecha, sensor y conjunto de parcelas.

Para cada fecha con NDVI disponible, se superpuso la capa de parcelas sobre la imagen correspondiente y se aplicó un procedimiento de estadísticos zonales. En la práctica, esto consiste en calcular, para todos los píxeles de NDVI contenidos dentro de cada parcela, una serie de métricas que resumen el comportamiento de la vegetación en ese entorno. En este estudio, la métrica principal utilizada fue el **NDVI medio de parcela**.

4.4. Resultados

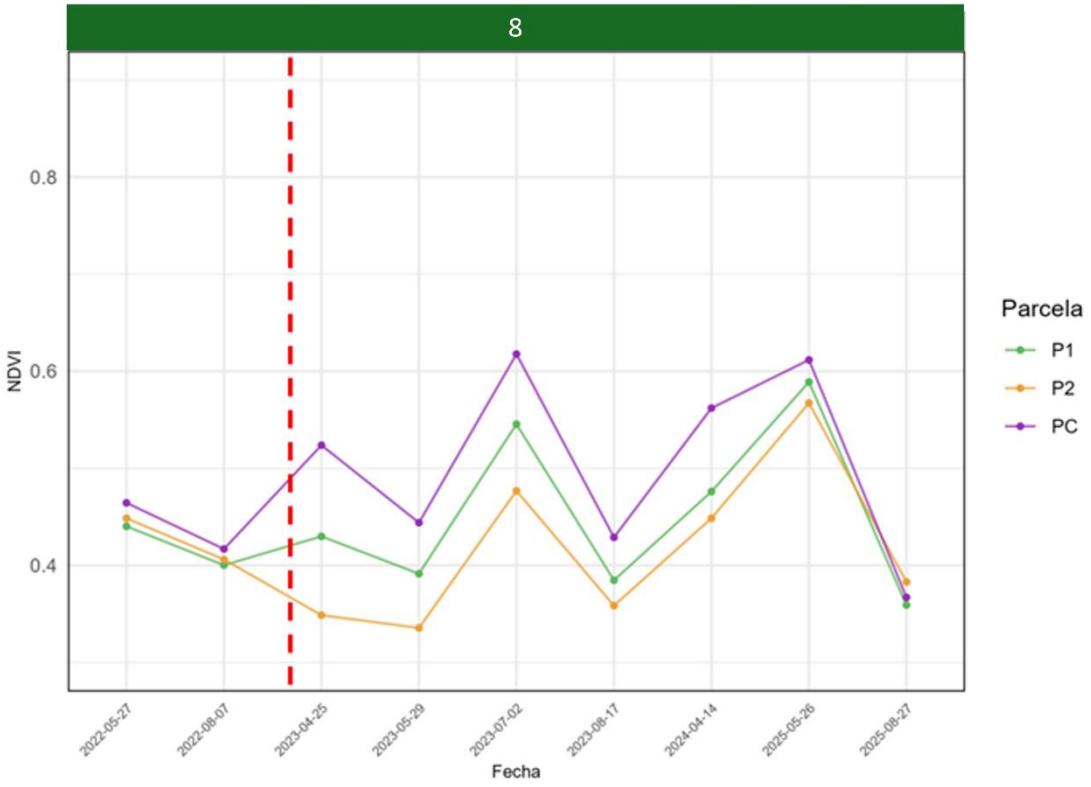
En conjunto, los valores de NDVI se sitúan en rangos propios de masas forestales activas, con valores generalmente superiores a 0,4 en los pinares más secos, y próximos o superiores a 0,7 en los pinares subhúmedos y supramediterráneos (Sora y provincia de Soria). Antes de la aplicación de los tratamientos selvícolas (pre-intervención), las curvas de las tres parcelas de cada triplete (P1, P2 y PC) muestran valores muy similares, lo que indica que las condiciones iniciales eran comparables dentro de cada rodal.

Tras la fecha de actuación (línea vertical roja), las series temporales muestran una combinación de patrones fenológicos (picos en primavera–verano y valores menores a finales de verano) y cambios atribuibles a la intervención. En la mayoría de rodales, el NDVI presenta una ligera disminución en las campañas inmediatamente posteriores al tratamiento, seguida de una recuperación parcial o casi completa en los años siguientes.

4.4.1. Respuesta al tratamiento en los rodales de Cataluña

Aiguamúrcia

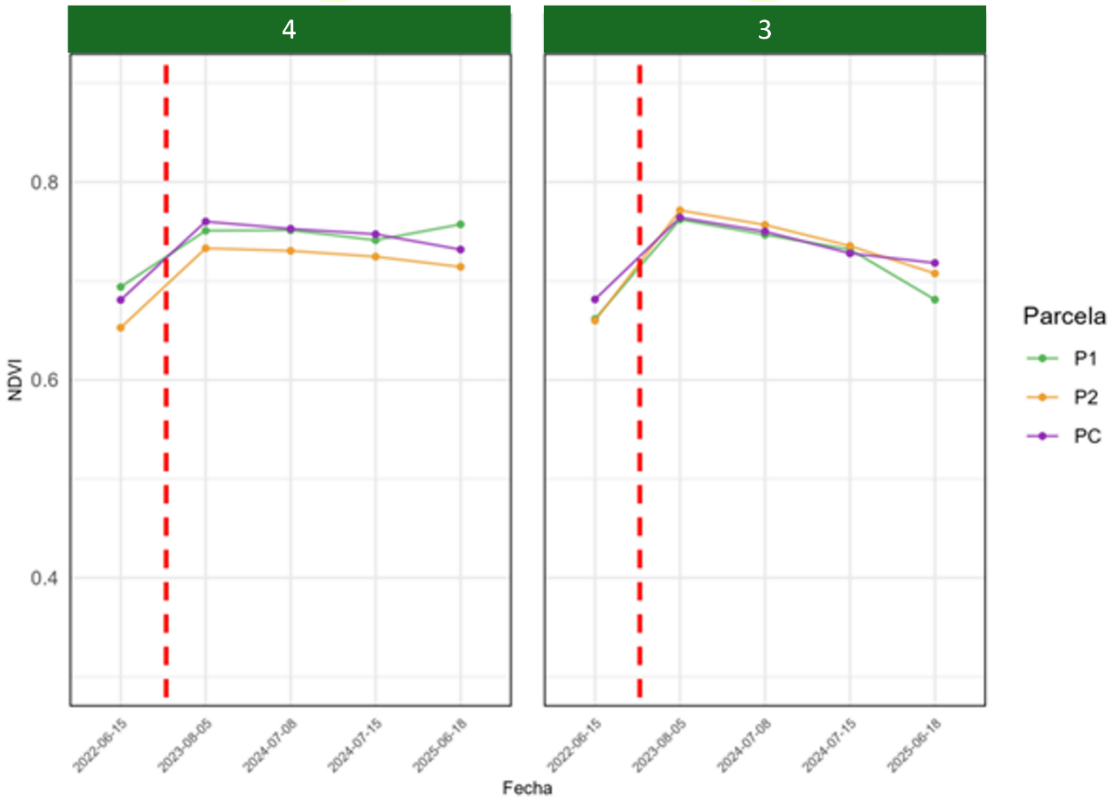
Los valores iniciales de NDVI, antes del tratamiento, son similares entre parcelas; con la PC ligeramente por encima de P1 y P2. Después del tratamiento, en las primeras fechas de 2023 se observa un aumento claro de la separación entre parcelas; PC alcanza valores de NDVI sensiblemente mayores, mientras que P1 y, sobre todo, P2 registran los valores más bajos. A lo largo de 2023 y 2024 el NDVI muestra una dinámica marcada por la fenología (picos en primavera, descensos en verano), pero el patrón PC > P1> P2 se mantiene consistente. En 2025 se aprecia una recuperación notable en P1 y P2, llegando a valores muy próximos a los de PC.



P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

Sora

En Sora (tripletes 3 y 4), con condiciones húmedas y valores de NDVI elevados, las series de los dos tripletes muestra patrones relativamente estables. En ninguno de los tripletes se detecta una caída clara del NDVI tras la actuación; las tres parcelas mantienen valores altos y relativamente estables, con diferencias reducidas entre tratamientos. En el triplete 3 sí se aprecia un ligero descenso del NDVI en los años posteriores a la intervención, pero este descenso es común a P1, P2 y PC, y las diferencias entre parcelas son pequeñas.

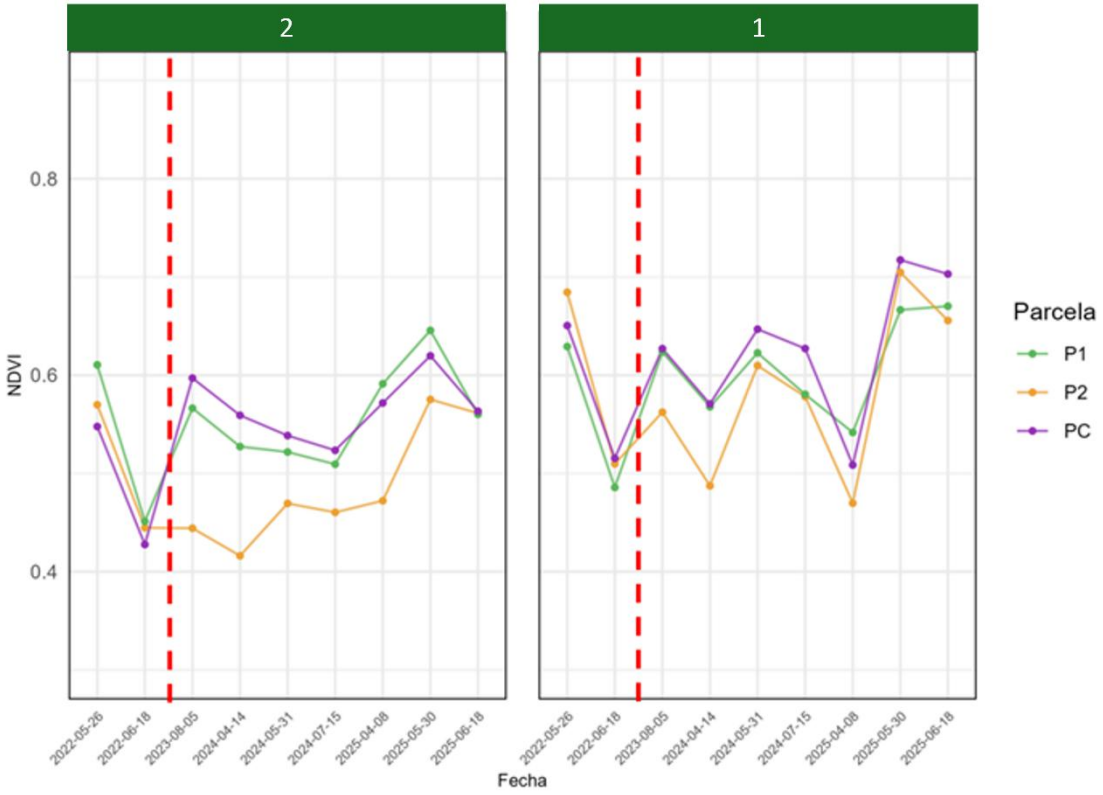


P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

Sant Mateu de Bages

En el triplete 2, las primeras fechas posteriores al tratamiento muestran NDVI relativamente bajos y próximos entre parcelas, pero conforme avanzan las campañas se va marcando un patrón: la parcela P2 (adehesamiento) se mantiene sistemáticamente por debajo de P1 (clara) y de la parcela control, especialmente en las fechas de primavera de 2024 y 2025, mientras P1 y PC convergen hacia valores algo más altos. Esto sugiere un efecto duradero de la mayor intensidad de tratamiento sobre el NDVI en esta combinación de especie y condiciones.

En el triplete 1, la respuesta es más compleja. Tras el tratamiento, la parcela P2 muestra claramente valores inferiores al control y a P1 durante buena parte de 2023 y 2024. Sin embargo, en las fechas finales de 2025 P2 experimenta una recuperación marcada, hasta situarse en niveles similares o incluso ligeramente superiores a los de P1, y muy próximos a la parcela control. Aquí la señal del tratamiento intenso es clara en los primeros años, pero tiende a atenuarse a medida que avanza la serie.

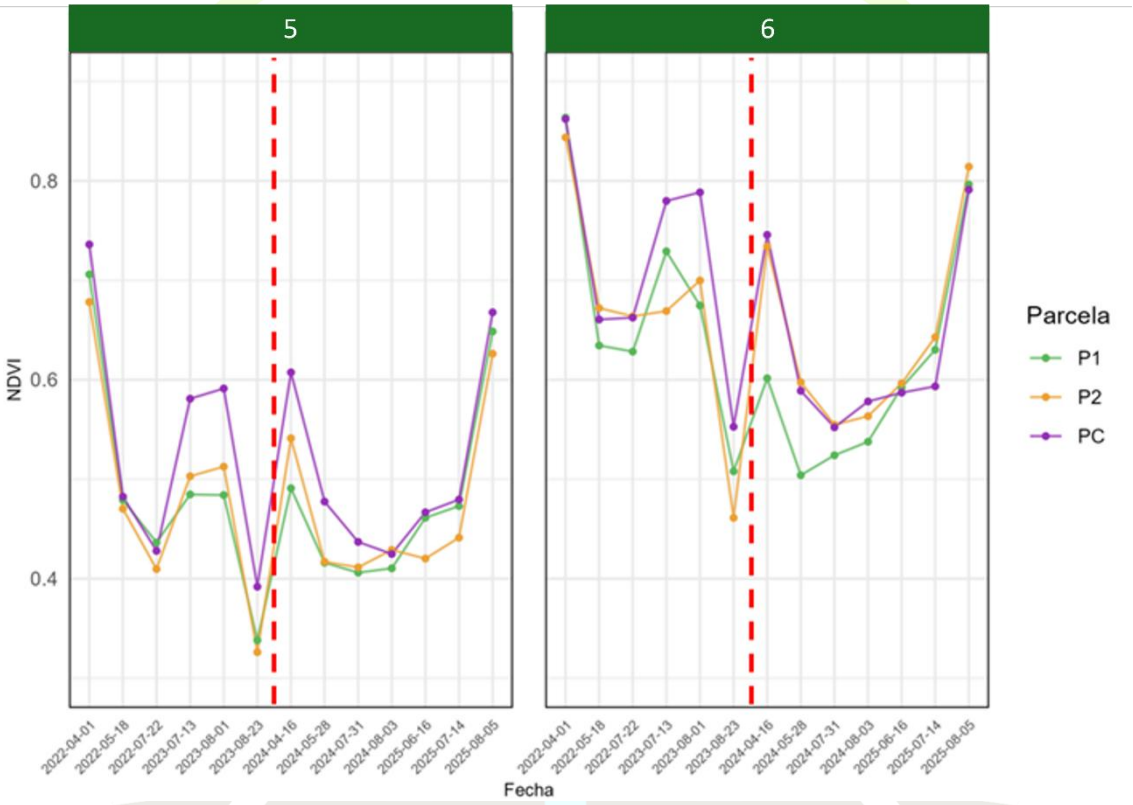


P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

Sant Climent de Llobregat

Sant Climent de Llobregat (tripletes 5 y 6) agrupa dos tripletes que representan situaciones de solana y umbría, respectivamente. Antes del tratamiento, los valores oscilan entre niveles relativamente bajos (en torno a 0,4–0,5 en determinadas fechas) y picos altos cercanos a 0,7–0,8, siguiendo los cambios estacionales. En ambos tripletes las tres parcelas muestran trayectorias muy similares, con diferencias pequeñas entre P1, P2 y PC.

Tras la actuación de 2023, las curvas de NDVI presentan descensos en determinadas fechas y recuperaciones en otras, pero sin un patrón claro y persistente que diferencie de forma neta a las parcelas tratadas de la parcela control. En las fechas finales de la serie (2025), las tres parcelas de cada triplete convergen de nuevo hacia valores de NDVI altos y muy próximos entre sí.

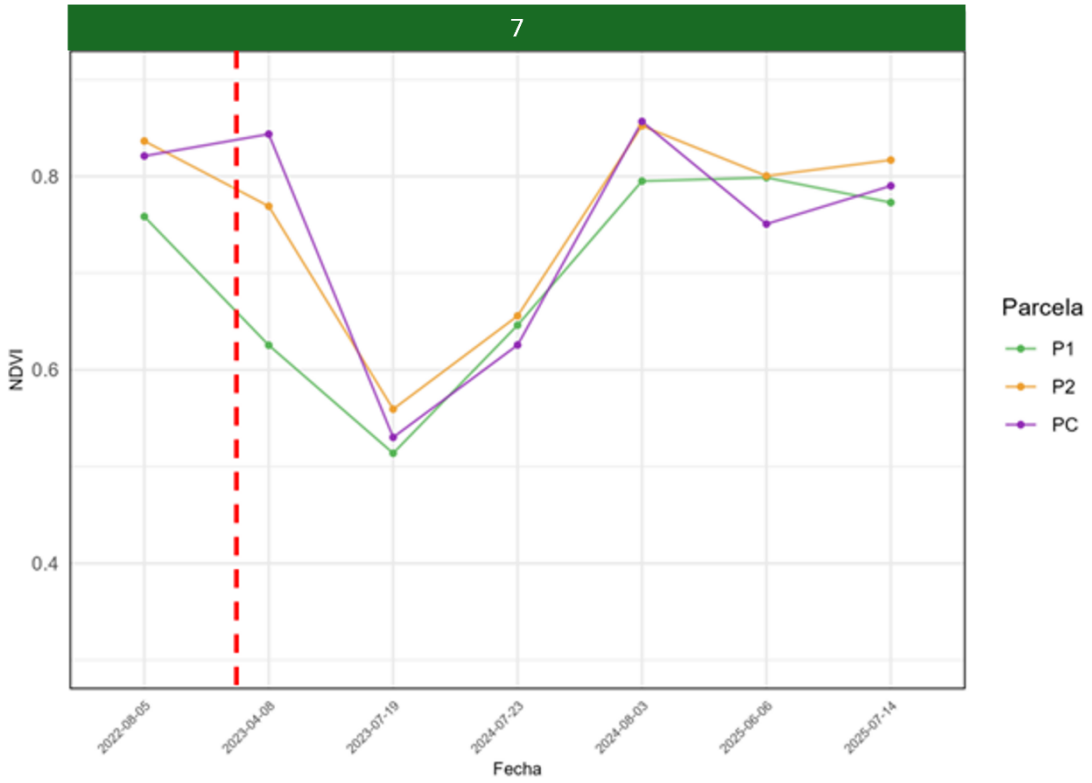


Triplete 5: P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

Triplete 6: P1 = adehesamiento; P2 = clara; PC = control

Sant Celoni

Los valores de NDVI previos al tratamiento son elevados y muy similares entre parcelas. En las primeras fechas tras la intervención se observa una reducción del NDVI, ligeramente más acusada en el tratamiento de clara (P1) que en el de desbroce (P2) – en Sant Celoni no pudo realizarse un adehesamiento, que en todo caso se mantienen cerca de PC. En los años siguientes, las tres parcelas convergen de nuevo hacia valores altos, con diferencias muy pequeñas entre tratamientos. De hecho, en las últimas fechas las curvas prácticamente se solapan.



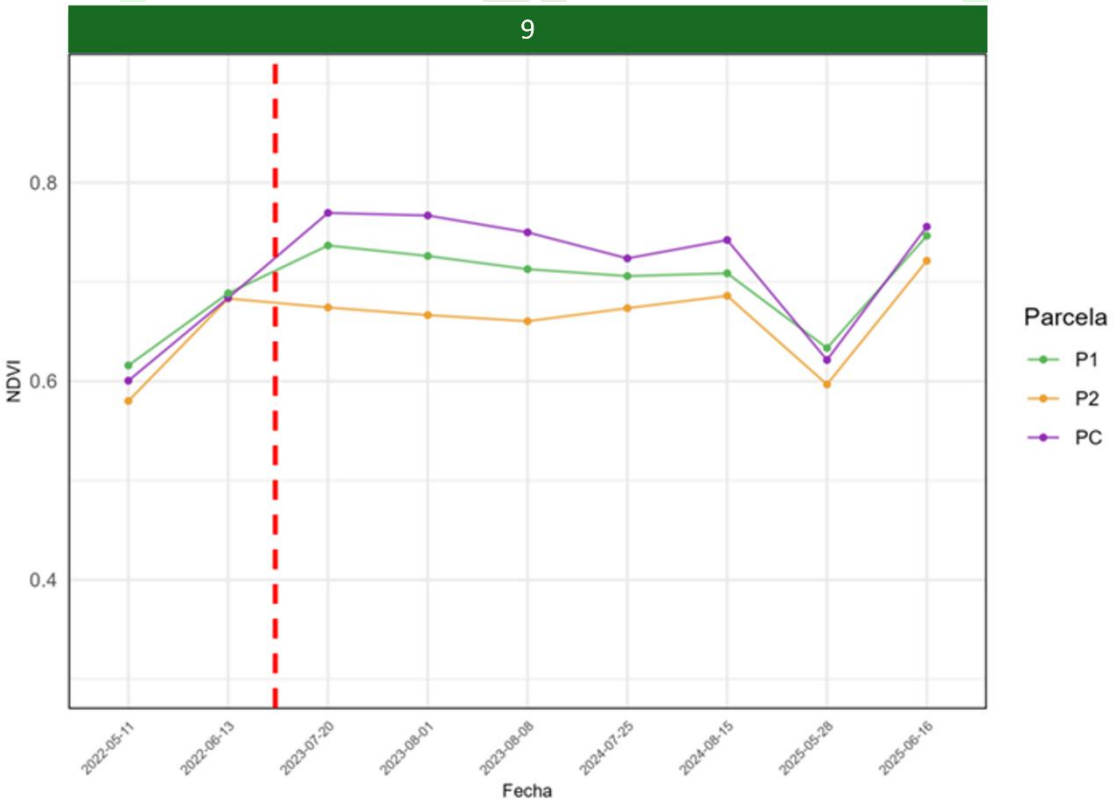
P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

4.4.2. Respuesta al tratamiento en los rodales de Soria

Muriel

En Muriel, los valores de NDVI antes del tratamiento son relativamente altos y muy similares entre las tres parcelas, con valores en torno a 0,6–0,7 y sin diferencias claras entre P1, P2 y PC, lo que indica unas condiciones iniciales comparables en el triplete.

Tras la actuación de octubre de 2022, las campañas de 2023–2025 muestran un patrón bastante estable: el NDVI se mantiene en un rango elevado, cercano a 0,7–0,8 en gran parte de la serie, con una ligera tendencia descendente hacia 2024 y un repunte en 2025. A lo largo de todo el periodo posterior al tratamiento se observa un gradiente consistente PC > P1 > P2: la parcela control registra sistemáticamente los valores más altos de NDVI, la parcela con tratamiento Clara (P1) presenta valores intermedios y la parcela con tratamiento Adehesamiento (P2) se sitúa en la parte baja del rango. Las diferencias absolutas entre parcelas son moderadas (del orden de unas pocas centésimas de NDVI), pero se mantienen de forma persistente en todas las fechas posteriores a la intervención.

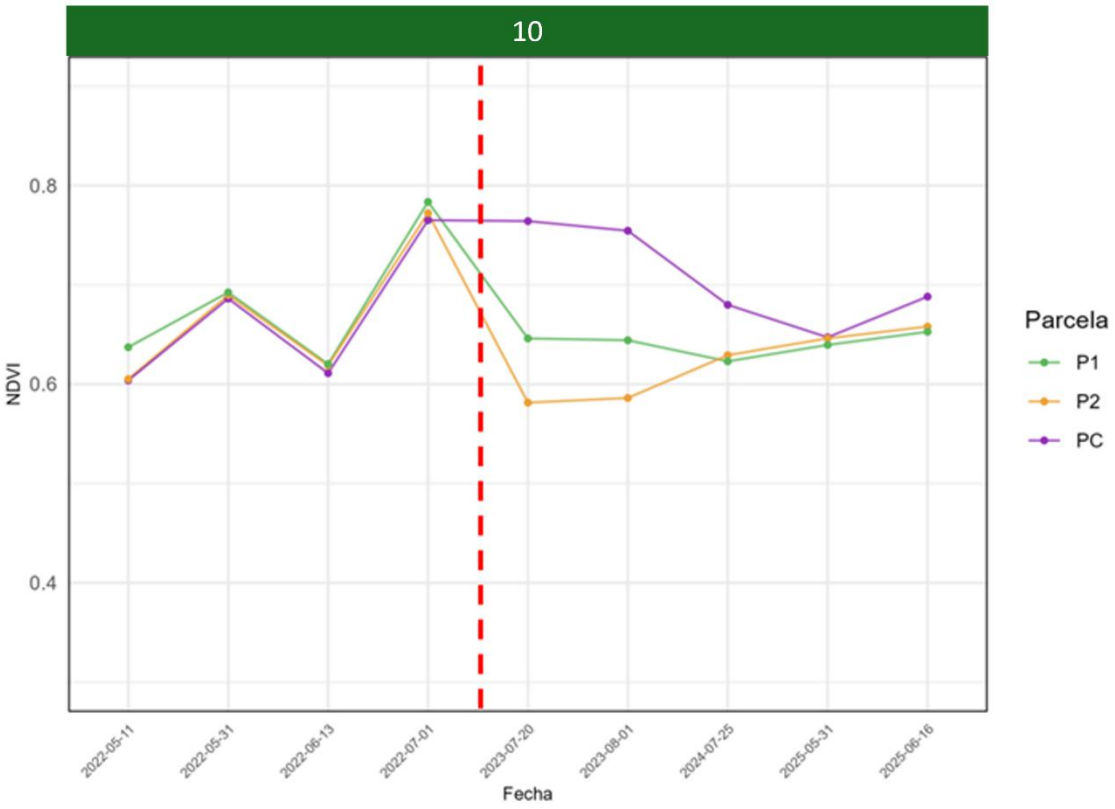


P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

Navaleno-Soria

El NDVI previo al tratamiento muestra también valores altos, con un incremento claro desde la primavera hasta mediados de verano de 2022 y sin diferencias apreciables entre las tres parcelas. En las últimas fechas antes de la actuación, las tres curvas prácticamente se solapan, lo que refuerza la idea de que las condiciones iniciales eran homogéneas.

Después del tratamiento de finales de 2022, la serie de 2023–2025 presenta un comportamiento algo distinto al de Muriel Viejo, pero con conclusiones similares: la parcela control (PC) se sitúa de manera consistente por encima de las dos parcelas tratadas, con valores de NDVI cercanos a 0,7–0,8 en 2023 y una ligera disminución posterior. P1 y P2 se mantienen por debajo de la parcela control, con diferencias relativamente pequeñas entre ellas: en los primeros años tras la actuación P2 tiende a presentar los valores más bajos, pero en los últimos puntos de la serie las curvas de P1 y P2 convergen y prácticamente se superponen. En conjunto, el tratamiento parece haber generado una reducción moderada y sostenida del NDVI en las parcelas intervenidas respecto a la parcela control, sin que se aprecien caídas bruscas ni cambios de tendencia radicales.

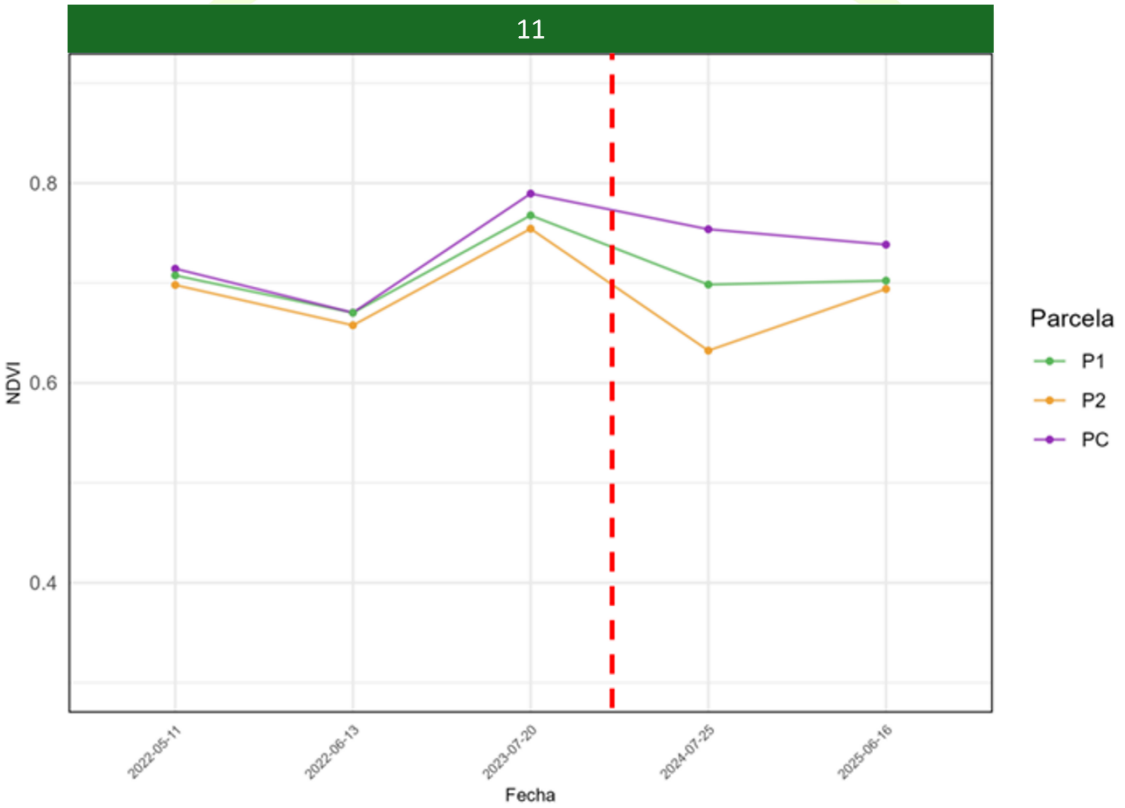


P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

La Póveda

En La Póveda el tratamiento es más reciente (octubre de 2023), de modo que la serie incluye menos campañas posteriores a la intervención. Antes del tratamiento, las tres parcelas presentan valores de NDVI altos (en torno a 0,7–0,8), con un comportamiento muy similar.

En las fechas posteriores a la actuación (2024–2025) se mantiene ese patrón, aunque las diferencias se hacen algo más visibles: al igual que en el resto de rodales de Soria, la parcela control sigue mostrando los valores más elevados, la parcela P1 se sitúa en un nivel intermedio y la parcela P2 desciende algo más en la primera campaña posterior al tratamiento, recuperando parte de la diferencia en la última fecha disponible. Aun así, incluso la parcela P2 conserva valores de NDVI claramente altos, sin indicios de una pérdida severa de vigor.



P1 = clara; P2 = adehesamiento; PC = control

4.5. Discusión

El análisis de las series de NDVI revela contrastes claros entre las masas de Soria y las masas de Cataluña. En los rodales sorianos (Muriel Viejo, Navaleno y La Póveda) los valores de NDVI son sistemáticamente elevados y relativamente estables en el tiempo, con oscilaciones moderadas entre campañas. En Cataluña, por el contrario, las series muestran una variabilidad interanual e intraanual más marcada, con descensos más evidentes en determinados veranos y diferencias mayores entre rodales.

Esta diferencia tiene probablemente un doble origen. Por un lado, responde a un gradiente ecológico: los rodales de Soria se ubican en pisos supramediterráneos, con veranos menos extremos y mayor disponibilidad hídrica relativa, mientras que varios rodales catalanes (especialmente Sant Climent y Aiguamúrcia) se sitúan en contextos donde el estrés hídrico estival es más frecuente e intenso. Por otro lado, está condicionada por el patrón de disponibilidad de imágenes: en Cataluña se dispone de más adquisiciones por año y, en particular, de más imágenes en julio–agosto, cuando es más probable observar caídas de NDVI asociadas a sequía, mientras que en Soria muchas nuevas imágenes se concentran en mayo–junio, en momentos fenológicos más favorables. Parte de la mayor variabilidad aparente del NDVI en Cataluña puede deberse, por tanto, a este muestreo temporal más denso y más centrado en el periodo de máximo estrés hídrico, y no únicamente a diferencias intrínsecas de vigor entre regiones.

Intensidad de tratamiento y diferencias entre parcelas (PC, P1, P2)

La comparación entre parcelas control y tratadas sugiere que el NDVI es sensible a la intensidad de los tratamientos selvícolas, aunque con una magnitud de cambio moderada. En la mayoría de rodales la parcela con tratamiento más intenso (adehesamiento) presenta de forma consistente los valores más bajos de NDVI tras la intervención, seguida por el tratamiento de clara y finalmente por la parcela control. Este patrón es coherente con una reducción de la fracción de copa viva y del índice de área foliar en las parcelas intervenidas, que se traduce en una menor reflectancia relativa en el infrarrojo cercano y, por tanto, en valores de NDVI algo menores.

En otros rodales de Cataluña (Sora, Sant Climent, Sant Celoni) la señal del tratamiento es más difusa. En algunos casos se observa un descenso inicial del NDVI con las intervenciones, pero las diferencias con la parcela control son pequeñas y tienden a quedar enmascaradas por la variabilidad climática e interanual. En estos contextos, la variación natural del NDVI a escala de rodal, asociada a sequía, diferencias fenológicas y particularidades locales de cada escena, es del mismo orden de magnitud que la señal de gestión, lo que dificulta extraer conclusiones robustas únicamente a partir de las series gráficas.

Recuperación post-tratamiento

En la mayoría de los rodales se observa una recuperación del NDVI en los años posteriores al tratamiento, incluso en las parcelas sometidas a la intervención más intensa. Este comportamiento podría interpretarse como la respuesta esperable de la vegetación remanente: tras la apertura del dosel, los árboles y matorrales que permanecen disponen de más recursos (luz, agua, nutrientes) y, con cierto desfase temporal, compensan parcialmente la pérdida inicial de superficie foliar a escala de parcela. La velocidad y magnitud de esta recuperación parecen depender del contexto ecológico. En ambientes subhúmedos y supramediterráneos (Sora y Soria), donde el estrés hídrico es relativamente menor, la trayectoria del NDVI sugiere una recuperación rápida y, en algunos casos, una estabilización en niveles similares a los previos. En ambientes más secos (pinares mediterráneos de Sant Climent y Aiguamúrcia) la respuesta es más variable y los valores de NDVI permanecen algo

más bajos o muestran oscilaciones marcadas, lo que podría estar asociado a una mayor sensibilidad a la sequía y a la variabilidad climática interanual.

Una de las hipótesis de partida del estudio era que las parcelas sometidas al tratamiento más intenso (P2) podrían llegar a mostrar valores de NDVI superiores a las parcelas control (PC). Sin embargo, los resultados obtenidos no respaldan esta hipótesis en la mayor parte de los rodales analizados. La única excepción es el triplete del encinar de Sant Celoni, donde P2 corresponde a un tratamiento de desbroce y no de adehesamiento, y que da lugar a valores de NDVI ligeramente superiores a los de PC en los últimos años de la serie.

Limitaciones metodológicas y fuentes de incertidumbre

Varios aspectos metodológicos condicionan la solidez y la generalización de los resultados:

a) Uso de múltiples sensores y armonización limitada: la serie temporal se ha construido a partir de imágenes procedentes de distintos sensores de muy alta resolución (*SPOT*, *Pléiades*, *WorldView*), seleccionadas en función de su disponibilidad. Aunque todas las escenas se han tratado de manera coherente, las diferencias en **calibración radiométrica, geometría, resolución y condiciones de adquisición** pueden introducir cierta variabilidad adicional, dificultando la comparación del NDVI entre zonas.

b) Distribución desigual de fechas y efectos fenológicos: la distribución de imágenes no es homogénea entre regiones ni entre años. En Cataluña se dispone de más fechas por campaña y más escenas en julio–agosto, cuando es más probable observar valores bajos de NDVI por estrés hídrico. En Soria predominan las imágenes de mayo–junio. Esta **asimetría en el calendario de adquisición** contribuye a que Cataluña muestre una variabilidad aparente mayor. Aunque se ha acotado el análisis al periodo abril–agosto, diferencias de pocas semanas pueden situar la observación en fases fenológicas distintas, complicando las comparaciones interanuales.

c) Duración de la serie y diseño experimental: el dispositivo se basa en tripletes P1–P2–PC con una replicación limitada por rodal y con pocas campañas previas a la actuación. La serie post-tratamiento cubre solo los primeros años de respuesta, cuando la señal climática interanual puede ser dominante. Esto reduce la capacidad para separar con claridad el efecto de la gestión del efecto del clima y limita la extrapolación de los resultados a otros contextos. La interpretación de los cambios asociados a la gestión debe hacerse considerando que el NDVI integra simultáneamente efectos de la fenología, del clima y de la estructura del dosel.

A pesar de estas limitaciones, los patrones observados apoyan la idea de que los tratamientos aplicados en el marco del proyecto producen impactos moderados y reversibles sobre el vigor de la cubierta forestal. La persistencia de un gradiente de NDVI entre parcelas control y tratadas en varias zonas indica que la teledetección de alta resolución puede ser una herramienta útil para monitorizar la intensidad y efectos de la gestión a escala de rodal.

Futuros trabajos podrían profundizar en estas conclusiones mediante:

i) el uso de **índices adicionales**;

ii) el **aumento de la densidad temporal de imágenes**, especialmente en los primeros años posteriores a la actuación, cuando se espera que el efecto del tratamiento sea más marcado;

iii) Integración de datos de teledetección y de campo.

5. Diseminación de los resultados del entregable

Los datos recopilados en esta acción, adecuadamente analizados, se emplean en, al menos, los siguientes productos de comunicación del proyecto:

· Vilarnau, M; Coello, J; Margalef, J; Llena, G; Gallego, M; Vilà, L; Tejedor, R; Mollà, S; Cárdenas, C; Liagre, F. Outcomes of LIFE AgroForAdapt (2021-26): five years promoting agroforestry for climate change adaptation in the Mediterranean. European Agroforestry Conference.

· Salida de campo del Seminario final del proyecto: 10 junio 2026.

· Jornada de campo del 23 de junio de 2026, organizada conjuntamente con el proyecto SUDOE CoopTree.

· Informe público con las conclusiones de los resultados del seguimiento de sistemas silvopastorales demostrativos AgroForAdapt.

Se prevé además la publicación de un artículo científico para evaluar los efectos de los tratamientos en los servicios ecosistémicos y el microclima forestal.

Referencias

Cáceres, Miquel De, Nicolas Martin-StPaul, Marco Turco, Antoine Cabon, and Victor Granda. 2018. Estimating Daily Meteorological Data and Downscaling Climate Models over Landscapes. *Environmental Modelling and Software* 108:186–96. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.003.

Krsnik, G., Busquets Olivé, E., Pique Nicolau, M., Larrañaga, A., Cardil, A., García-Gonzalo, J., & González Olabarría, J. R. (2020). Regional level data server for fire hazard evaluation and fuel treatments planning. *Remote Sensing*, 12(24), 4124.

Vicente-Serrano, Sergio M., Santiago Beguería, and Juan I. López-Moreno. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate 23* (7): 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1