Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 51(1): 113-128 (2025)
Doi: https://doi.org/10.31167/csef.v0i51.20164
Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales
Acceso abierto disponible en http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index

Efectividad de tratamientos adaptativos tempranos (clareos y desbroces) para evitar el decaimiento de masas regeneradas post-incendio de *Pinus halepensis* Mill. por el efecto de la sequía

Effectiveness of early adaptive treatments (thinning and clearing) to prevent the decline of post-fire regenerated stands of *Pinus halepensis* Mill. due to drought

Arquero, R.[1*]; Rubio, E.[3]; Chebbi, W.[1]; García-Morote, F.A.[1,2]; Andrés-Abellán, M.[1,2]; Picazo-Córdoba, M.I.[1]; López-Serrano, F.R.[1,2]

[1] *Grupo de Medio Ambiente y Recursos Forestales, Instituto de Investigación de Energías Renovables, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete*
spain.wafa.chebbi@uclm.es (W.C.); martaisabel.picazo@uclm.es (M.P.)

[2] *Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071, Albacete, Spain.*
fcoantonio.garcia@uclm.es (F.C.); manuela.andres@uclm.es (M.A.); fco.lopez@uclm.es (F.L.)

[3] *Departamento de Física, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071, Albacete.*
spain. evamaria.rubio@uclm.es (E.R.)

[*] Autor de correspondencia: rocio.arquero@uclm.es (R.A.)

Resumen

El cambio climático ha incrementado la frecuencia y severidad de las sequías, afectando negativamente a los bosques. Para mitigar estos efectos, se han propuesto tratamientos como los clareos, que reducen la competencia por recursos hídricos y mejoran la resiliencia de los árboles. Este estudio se llevó a cabo en los montes "Grajas" (MUP-AB83) y "Los Donceles" (MUP-AB82), en Hellín, Albacete, España, donde se aplicaron tratamientos de clareo y desbroce en parcelas de pino carrasco regeneradas de forma natural tras un incendio acaecido en julio de 2012.

Los resultados muestran que los tratamientos de clareo aumentaron significativamente el crecimiento diametral de los árboles y el flujo de savia a nivel individual. Además, la transpiración a nivel de rodal disminuyó ligeramente debido a la menor densidad de árboles, lo cual supuso un ahorro en consumo del agua del suelo, que permite mejorar la supervivencia de la masa. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos en otras especies y condiciones climáticas similares, sugiriendo que los clareos pueden mejorar la eficiencia del uso del agua.

En conclusión, los tratamientos de gestión adaptativa aplicados a las masas jóvenes de pino carrasco regeneradas post-incendio han demostrado ser efectivos para mejorar el crecimiento y el flujo de savia, y reducir la transpiración a nivel de rodal. Estos resultados son relevantes para la gestión forestal en climas mediterráneos y pueden contribuir a estrategias de manejo más eficientes y sostenibles bajo el contexto de cambio climático.

Palabras claves: Crecimiento, Flujo de savia, Gestión forestal, Transpiración.

Abstract

Climate change has increased the frequency and severity of droughts, negatively affecting forests. To mitigate these effects, treatments such as thinning have been proposed to reduce competition for water resources and improve tree resilience. This study was conducted in the "Grajas" (MUP-AB83) and "Los Donceles" (MUP-AB82) forests in Hellín, Albacete, Spain, where thinning and clearing treatments were applied to naturally regenerated Aleppo pine stands following a fire in July 2012.

The results show that thinning treatments significantly increased the diameter growth of trees and individual sap flow. Additionally, stand-level transpiration slightly decreased due to the lower tree density, leading to savings in soil water consumption, which improves stand survival. These findings are consistent with previous studies on other species and similar climatic conditions, suggesting that thinning can improve water use efficiency.

In conclusion, adaptive management treatments applied to young post-fire regenerated Aleppo pine stands have proven effective in improving growth and sap flow, and reducing stand-level transpiration. These results are relevant for forest management in Mediterranean climates and can contribute to more efficient and sustainable management strategies under climate change.

Keywords: Growth, Sap flow, Forest management, Transpiration

1. Introducción

En los últimos años, el cambio climático ha provocado un aumento de la temperatura media global, y se prevé que esta tendencia continúe en los próximos años, lo que resultará en un incremento y una mayor severidad de las sequías. Además, los cambios en el régimen de precipitación pueden ocasionar periodos más prolongados entre eventos de precipitación (Helman *et al.*, 2017; Lombardi *et al.*, 2023). El aumento de la temperatura del aire, junto con la disminución de la humedad del suelo, produce estrés en las plantas debido al incremento de la evapotranspiración (André-Alphonse *et al.*, 2023). La evapotranspiración es el principal mecanismo que mantiene el equilibrio hídrico de los bosques, ya que modula el intercambio de agua y carbono en el ecosistema (Sun *et al.*, 2014). Como consecuencia de este incremento, se ha observado un aumento de la mortalidad inducida por sequía en todo el mundo y una afectación de los servicios ecosistémicos (Senf *et al.*, 2020; André-Alphonse *et al.*, 2023).

Para mitigar los efectos de la sequía se han propuesto tratamientos silvícolas, tales como los clareos y claras, una de las prácticas más comúnmente utilizadas en la gestión forestal de nuestros bosques. Estos tratamientos reducen la competencia por los recursos hídricos y suavizan los efectos perjudiciales de las sequías sobre el crecimiento de los árboles, mejorando el crecimiento de los árboles y el tamaño de las cosechas de semillas (Palmero-Iniesta *et al.*, 2017; André-Alphonse *et al.*, 2023). Además, los tratamientos silvícolas contribuyen a la provisión de la biodiversidad, el secuestro de carbono y las funciones hidrológicas (del Campo *et al.*, 2022). También reducen la cantidad y continuidad de combustibles, limitando así el potencial efecto destructivo de los incendios forestales (Palmero-Iniesta *et al.*, 2017; del Campo *et al.*, 2022). Por tanto, aumenta la resistencia y la resiliencia de los árboles en casos de sequía (Manrique-Alba *et al.*, 2020). En la mayoría de los casos, el clareo conduce a reducciones de la transpiración, aunque se han documentado casos en los que ha habido aumento de flujo de savia en los árboles restantes (Iida *et al.*, 2024), y casos en los que no ha habido diferencias significativas en la evapotranspiración entre las zonas control y las zonas donde se han aplicado clareos, como muestra Liu *et al.* (2018). Simonin *et al.* (2007) y del Campo *et al.* (2019), por el contrario, han documentado niveles de transpiración por árbol mayores en las parcelas clareadas en zonas de sequía. Aunque se ha demostrado que las claras reducen la competencia individual, es fundamental llevar a cabo estudios en regiones áridas y semiáridas, donde el agua constituye el principal factor de estrés que limita el crecimiento (Navarro *et al.*, 2010).

El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) es una de las coníferas más extendidas de la cuenca mediterránea, capaz de crecer en condiciones ambientales extremas de temperatura y precipitación (Moya *et al.*, 2007). Esta especie proporciona a los bosques estabilización del ciclo hidrológico, protección del suelo y productos madereros. Sin embargo, las plantaciones de alta densidad son propensas a incendios, plagas y a la muerte regresiva por eventos de sequía extrema (Manrique-Alba *et al.*, 2020).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el impacto de los tratamientos de gestión adaptativa, específicamente los tratamientos de clareo aplicados a masas

jóvenes de pino carrasco (*Pinus halepensis*) regeneradas después de un incendio. El estudio se centra en analizar cómo estos tratamientos afectan el crecimiento de los árboles y el flujo de savia a nivel individual, así como la transpiración a nivel de rodal. Además, se busca comparar estos resultados con los obtenidos en estudios previos realizados en otras especies y en diferentes condiciones climáticas, que confirman o no la efectividad y las implicaciones de los tratamientos de clareo en la gestión forestal en zonas mediterráneas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y diseño experimental

La zona de estudio se ubica en los montes "Grajas" (MUP-AB83) y "Los Donceles" (MUP-AB82), ubicados en la Sierra de Los Donceles en el término municipal de Hellín (Albacete), en el sureste de Península Ibérica (coordenadas UTM: X: 613,761 m; Y: 4,252,209 m; 425 m.s.n.m.). Según la clasificación de Köppen (Kottek *et al.*, 2006), esta zona presenta un clima mediterráneo semiárido, de tipo BSk, caracterizado por precipitaciones escasas concentradas en primavera y otoño, y veranos secos con altas temperaturas. Las temperaturas y precipitaciones medias anuales son de 15.3 ºC y 332 mm, respectivamente, mientras que las temperaturas extremas varían entre los 45.4 ºC en agosto y los -5.5 ºC en diciembre (Agencia Estatal de Meteorología, AEMET). Geológicamente, la Sierra de los Donceles se encuadra en la cordillera Prebética, entre los ríos Mundo y Segura. El sotobosque de la zona está dominado por coscoja (*Quercus coccifera* L.), espino negro (*Rhamnus lycioides* L), romero (*Salvia rosmarinus* Spenn.), esparto (*Macrochloa tenacissima* L.) y lentisco (*Pistacia lentiscus* L).

En julio de 2012, esta Sierra sufrió un incendio forestal que afectó aproximadamente 6500 hectáreas (García Matallana *et al.*, 2022). La vegetación actual en la zona de estudio es resultado de la regeneración natural de la misma y está formada por rodales de pino carrasco (*Pinus halepensis*) de 11 años de edad.

En el área de estudio *(Figura 1)* se llevó a cabo un diseño experimental factorial completo con dos factores: Factor A (sitio) con dos niveles, solana y umbría;

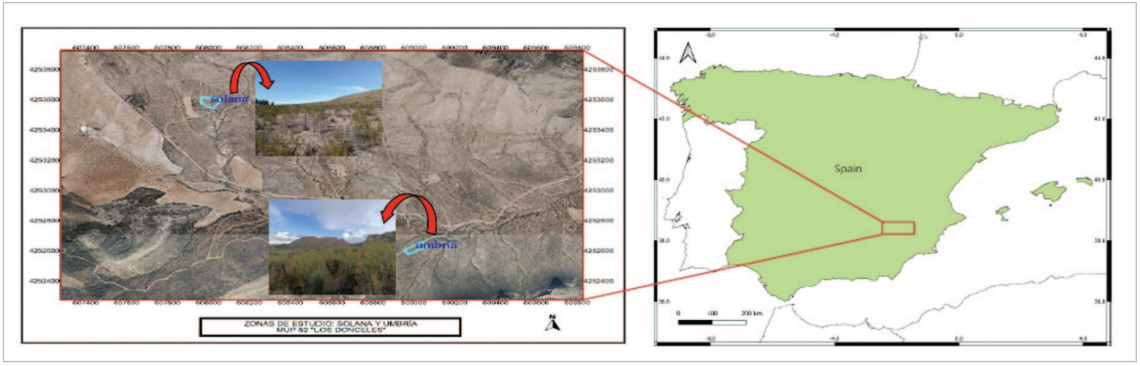


Figura 1. Localización de la zona de estudio

Factor B (tratamiento), con dos niveles, control y desbroce total + clareo (densidad final 2200 pies ha^{-1}) con dos réplicas (parcelas de 15 x 5 m^2 aproximadamente). Esto es un total de 8 parcelas (i.e. 2 sitios x 2 tratamientos x 2 réplicas); en cada parcela se marcaron 16 pies/parcela distribuidos lo más sistemáticamente posible y cubriendo todas las clases diamétricas a efectos de seguimiento de su crecimiento. Los pies marcados serán los que se dejarán tras la aplicación de los clareos en las correspondientes parcelas (equivalente a 2200 pies ha^{-1}).

2.2. Tratamientos de clareo y desbroce

El trabajo de campo se inició en abril de 2023 con los tratamientos arriba mencionados. En el clareo, la densidad de los rodales se redujo, en promedio, en un 93 %, pasando de aproximadamente 31,500 pies ha^{-1} a los mencionados 2,200 pies ha^{-1}. En cuanto al desbroce del matorral, se eliminó prácticamente el 100 % del matorral. Además, se dejó un buffer de tres metros alrededor de cada una de las parcelas para que no hubiese efectos de borde.

2.3. Caracterización del rodal usando inventariación clásica y tecnología LIDAR terrestre móvil

Las ocho parcelas de medición se inventariaron en abril de 2023 (justo antes del tratamiento) y posteriormente se volvieron a inventariar, un año después, en febrero de 2024, mediante técnicas clásicas. De este modo se obtuvo la altura de los árboles (H_t), diámetro de copa (D_{copa}), diámetro del tronco a 10 cm del suelo ($D_{0.1}$) y el número de piñas. Para ello, se utilizaron cintas métricas y calibres. Además, en el inventario realizado en febrero de 2024 se contó en cada una de las parcelas cuántos pies habían muerto debido a la sequía.

Simultáneamente, las parcelas también fueron escaneadas con tecnología LiDAR terrestre móvil (LTM). El escaneado se realizó justo antes de los tratamientos e inmediatamente tras su ejecución. Con esta tecnología, se cuantificó el tamaño de las parcelas, y se evaluó la fracción de cabida cubierta (a 20 cm sobre el suelo) de pinos y matorral. Estos datos LiDAR se procesan primeramente con el Software *GeoSLAM Hub* para visualizar la nube de puntos y con el software *GeoSLAM Draw* podemos recortar y georreferenciar la imagen. Por último, se utilizó el software AID-FOREST (López Serrano *et al.*, 2022) para obtener la fracción de cabida cubierta (Fcc, %).

2.4. Medición de flujo de savia

Para la medición de flujo de savia se seleccionaron en total 6 árboles de la zona de umbría con diámetro de tronco comprendido entre 6 y 20 mm, 3 en las parcelas control y 3 en las parcelas tratadas. El flujo de savia se midió utilizando el método de balance de calor del tronco (SHB: Stem Heat Balance) (Cermák *et al.*, 1984). El sistema incluye un sensor de medición EMS64 (EMS Brno) conectado a un datalogger (MicroSet 6X, EMS Brno) *(Figura 2, a)*. Este sensor a su vez consta de dos par-

tes cilíndricas que recubren el tronco. Uno de los cilindros (el superior) contiene los elementos calefactores y cubre un termopar, mientras que el otro cilindro cubre el termopar de la aguja de referencia *(Figura 2, b)*. El fundamento teórico del método SHB se detalla en Cermák *et al.* (2004) y se basa en el calentamiento de la savia mediante elementos calefactores, en combinación con el uso de termopares que miden el aumento de temperatura. Este aumento se mantiene a un nivel preestablecido de 2, 4 o 8 ºK. De este modo, la energía utilizada para mantener constante la diferencia de temperatura fijada (ºK) es directamente proporcional a la cantidad de savia que pasa a través del sensor, medida en kg h^{-1}. La medición del flujo de savia se llevó a cabo durante 218 días (7 meses), desde julio de 2023 hasta febrero de 2024. El flujo de savia se mide para saber si los tratamientos de clareo han tenido algún efecto sobre la transpiración a nivel de la masa forestal. Para obtener los datos de transpiración, dividimos el flujo de savia por la superficie de copa de cada árbol (m^2). Estos datos se reescalaron a nivel de hectárea. Debido a que el diámetro del tronco medio de la masa coincide con el diámetro del tronco de los pies muestra escogidos



Figura 2. (a). Sensor de medición de flujo de savia EMS64 junto con datalogger Microset 6X en la zona de estudio; (b). Detalle de los cilindros que recubren los termopares.

para medir el flujo de savia, el reescalado se obtuvo multiplicando los kg de agua acumulados durante todo el estudio por el número de pies ha^{-1}.

3. Resultados

3.1. Características antes y después de los tratamientos de las parcelas de estudio.

La *tabla 1* muestra un breve resumen del estado de nuestra zona de estudio previo al tratamiento de clareo y desbroce y justo después de realizar dicho tratamiento. Ambos inventarios fueron realizados en abril de 2023. El análisis de la varianza realizado (resultados no mostrados) confirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas zonas (solana y umbría) y entre las parcelas de tratamiento de la solana y de la umbría, antes y después de realizar el clareo y desbroce.

Tabla 1. Principales características dasométricas (media ± desviación estándar, n: número de parcelas) de las zonas de estudio, en abril de 2023, justo antes de los tratamientos. Número de pinos por hectárea (N, pies ha-1), altura media (Ht, cm) y diámetro medio del tronco a 10 cm sobre el suelo (D0.1, mm) se obtuvieron mediante técnicas clásicas, mientras que la fracción de cabida cubierta (Fcc, %) fue obtenida con tecnología LiDAR

			Solana		**Umbría**	
			Antes del tratamiento	Justo después del tratamiento	Antes del tratamiento	Justo después del tratamiento
CONTROL	n=2	N (pies ha^{-1})	23000±9000	23000±9000	38000±12000	38000±12000
		H_t (cm)	100±30	100±30	115±10	115±10
		$D_{0.1}$ (mm)	16±5	16±5	14±2	14±2
		Fcc (%)	31±4	31±4	23±6	23±6
TRATAMIENTO	n=2	N (pies ha^{-1})	32000±15000	2140±80	32000±3000	2300±170
		H_t (cm)	95±10	90±23	130±23	120±30
		$D_{0.1}$ (mm)	15±2	16±3	17.8±1	18±1
		Fcc (%)	18±1	4±1	21±1	5±4

3.2. Crecimiento

La *Figura 3* muestra el crecimiento diametral de los árboles a 10 cm del suelo en las parcelas tratadas y control de las zonas solana y umbría. Como podemos observar, en las parcelas en las que se ha llevado a cabo el tratamiento, el crecimiento diametral de los árboles fue significativamente mayor que en las zonas control, independientemente de la calidad del sitio. Los valores de F-Snedecor y nivel de significación (P) en la *Tabla 2* del ANOVA proporcionan evidencia estadística de que el factor calidad de sitio no ha influido significativamente en las diferencias obser-

vadas en el crecimiento diametral de los árboles. En contraste, el factor tratamiento aplicado sí influye significativamente, validando así su efectividad en la gestión forestal post-incendio.

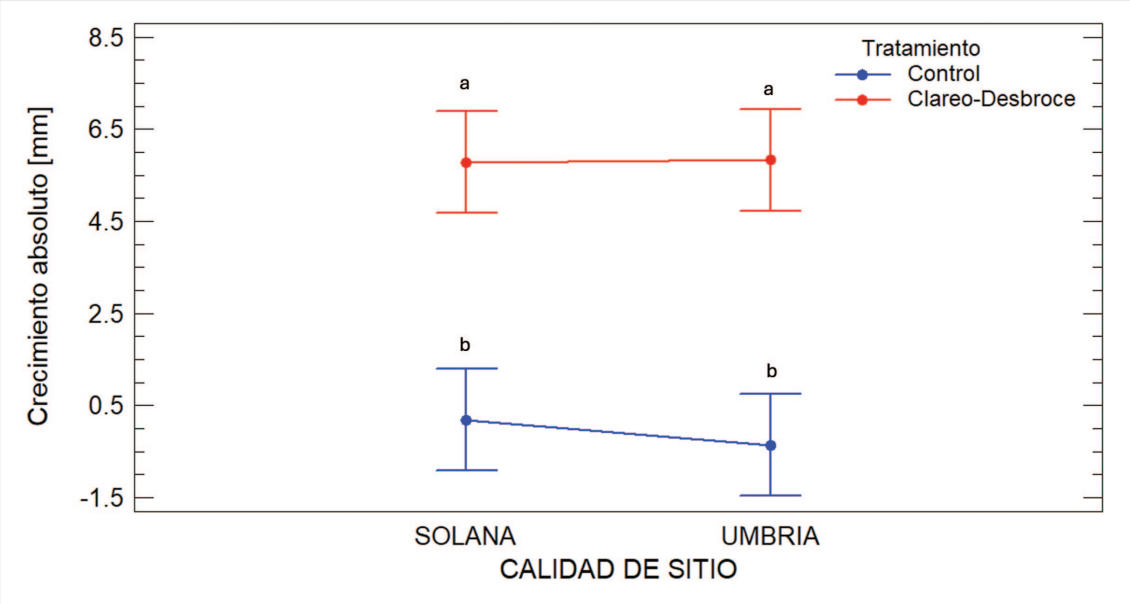


Figura 3. Crecimiento diametral absoluto (mm) a 10 cm del suelo para las parcelas tratadas y no tratadas (control) en las diferentes estaciones de calidad de sitio (solana y umbría) durante el periodo de estudio (julio de 2023 hasta febrero de 2024).

Tabla 2. Resumen del análisis de la varianza para el crecimiento diametral absoluto (mm) n=128 árboles marcados.

FACTORES	Suma de cuadrados	G.I	Media	F-Snedecor	P-Valor
A: CALIDAD DE SITIO	2.00	1	2.00	0.20	0.65
B: TRATAMIENTO	1112.74	1	1112.74	111.84	0.00
INTERACCIONES AB	2.94	1	2.94	0.30	0.59
RESIDUALES	1233.71	124	9.95		

3.3. Mortalidad

La *Figura 4* muestra el número de pies muertos por hectárea a lo largo del periodo de estudio, tanto en las parcelas control como en las tratadas. En las parcelas control en umbría, la mortalidad fue 4 veces mayor que en las parcelas control en solana. En las parcelas donde se aplicaron los tratamientos de clareo y desbroce, la mortalidad se redujo a cero. El análisis de varianza de la mortalidad de pies *(Tabla 3)* confirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre las parcelas control en umbría y solana, así como entre las parcelas control y las tratadas

(Valor P = 0.01). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la mortalidad entre las parcelas tratadas en umbría y solana. Estos resultados confirman el papel significativo del tratamiento en la reducción de la mortalidad, independientemente de la calidad del sitio.

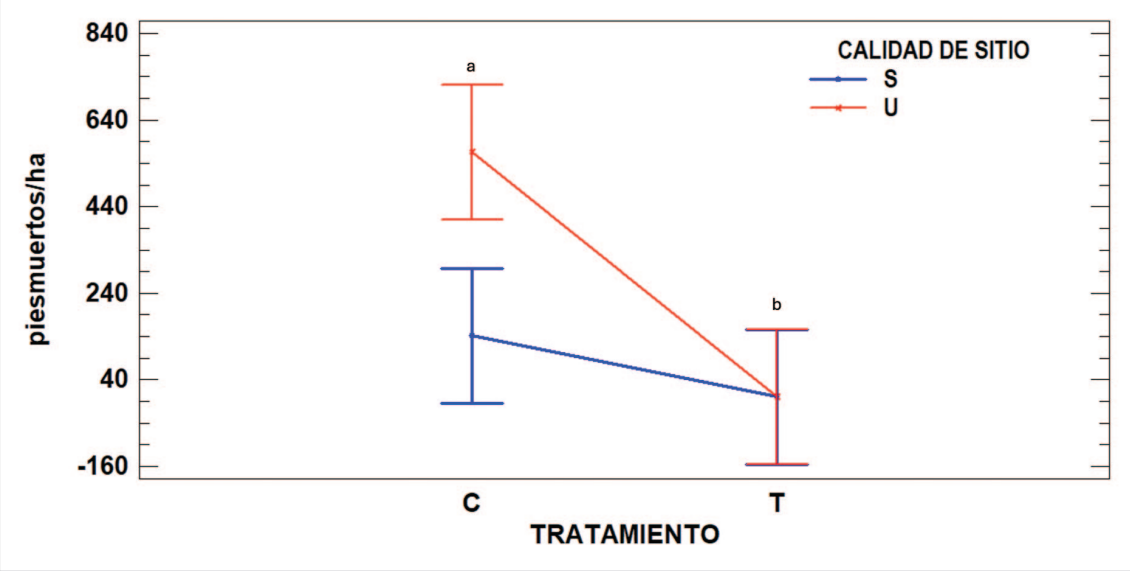


Figura 4. Número de pies muertos por hectárea en función de la calidad de sitio y el tratamiento ejecutado en el periodo desde julio de 2023 hasta febrero de 2024.

Tabla 3. Resumen del análisis de la varianza para número de pies muertos por hectárea (pies ha^{-1}) para los 8 bloques muestreados.

FACTORES	Suma de cuadrados	G.I	Media	F-Snedecor	P-Valor
A: CALIDAD DE SITIO	8799.1	1	8799.1	6.99	0.06
B: TRATAMIENTO	253116.0	1	253116.0	20.10	0.01
INTERACCIONES AB	87990.1	1	87990.1	6.99	0.06
RESIDUALES	50372.5	4	12593.1		

3.4. Transpiración a nivel árbol y a nivel rodal

Para evaluar el impacto de la gestión forestal en la transpiración de los árboles, se llevó a cabo un experimento de 218 días, desde julio de 2023 hasta febrero de 2024. La *Figura 5* ilustra la cantidad de agua transpirada por los árboles durante este periodo. En las zonas de control, la transpiración acumulada a nivel de individuo fue de 14 ± 14 g H_2O $día^{-1}$, mientras que en las zonas tratadas alcanzó los 230 ± 80 g H_2O $día^{-1}$. Esto indica que la transpiración por individuo fue 15 veces mayor en las áreas donde se realizaron los tratamientos de clareo y desbroce en comparación con las zonas control no tratadas (Valor P=0.01). La *Tabla 4* muestra estos valores medios

y la variabilidad entre los individuos monitorizados en parcelas control y en parcelas tratamiento.

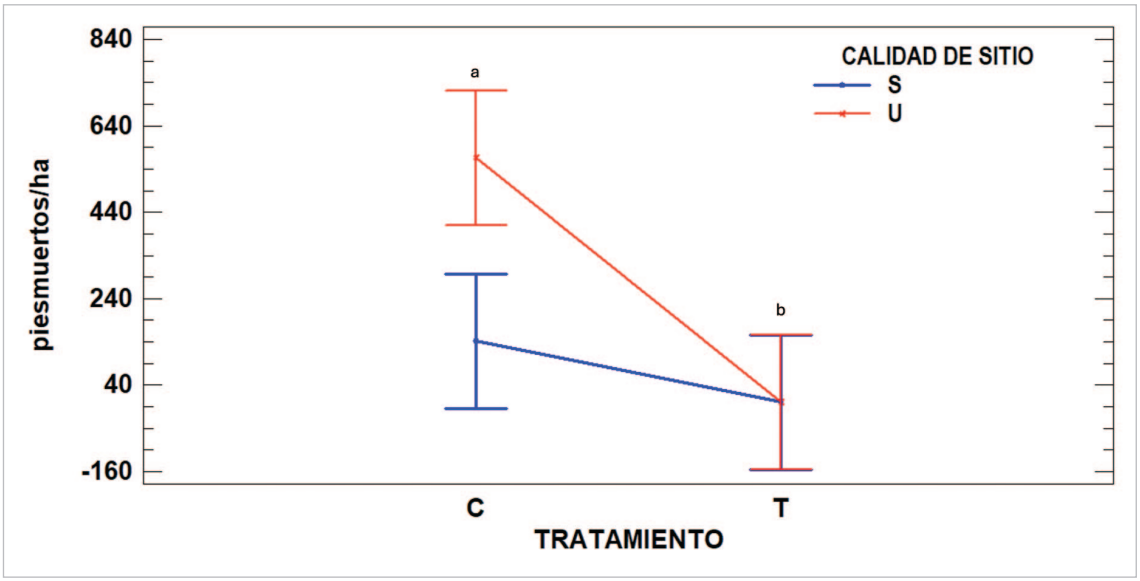


Figura 5. Transpiración acumulada (kg H_2O) por árbol en las zonas control y tratamiento, en los 218 días que duró el experimento (desde julio de 2023 hasta febrero de 2024)

Tabla 4. Resumen estadístico para la transpiración por árbol [g H_2O $día^{-1}$] obtenida en los 6 pies monitorizados.

TRATAMIENTO	n	Promedio	Desv. estándar	Coef. variación	Mínimo	Máximo	Rango
C	3	14	14	408	5	28	23
T	3	230	80	161	165	317	151
TOTAL	6	120	140	482	5	317	312

Para evaluar el impacto del clareo y desbroce en la transpiración del agua a nivel de rodal, se utilizaron los datos del número de pies y los diámetros obtenidos con los inventarios. El análisis de estos datos se presenta en la *Figura 6* y en la *Tabla 5*, que muestra los kilogramos de agua transpirados por hectárea y por día en las zonas tratadas y no tratadas durante el periodo estudiado. Los resultados indican que la transpiración en la zona control fue de 552 ± 110 kg ha^{-1} $día^{-1}$ de agua, mientras que en la zona tratada fue de 528 ± 48 kg ha^{-1} $día^{-1}$. Aunque la transpiración fue ligeramente superior en la zona no tratada, las diferencias no fueron estadísticamente significativas (Valor P=0.812) (análisis ANOVA no mostrado).

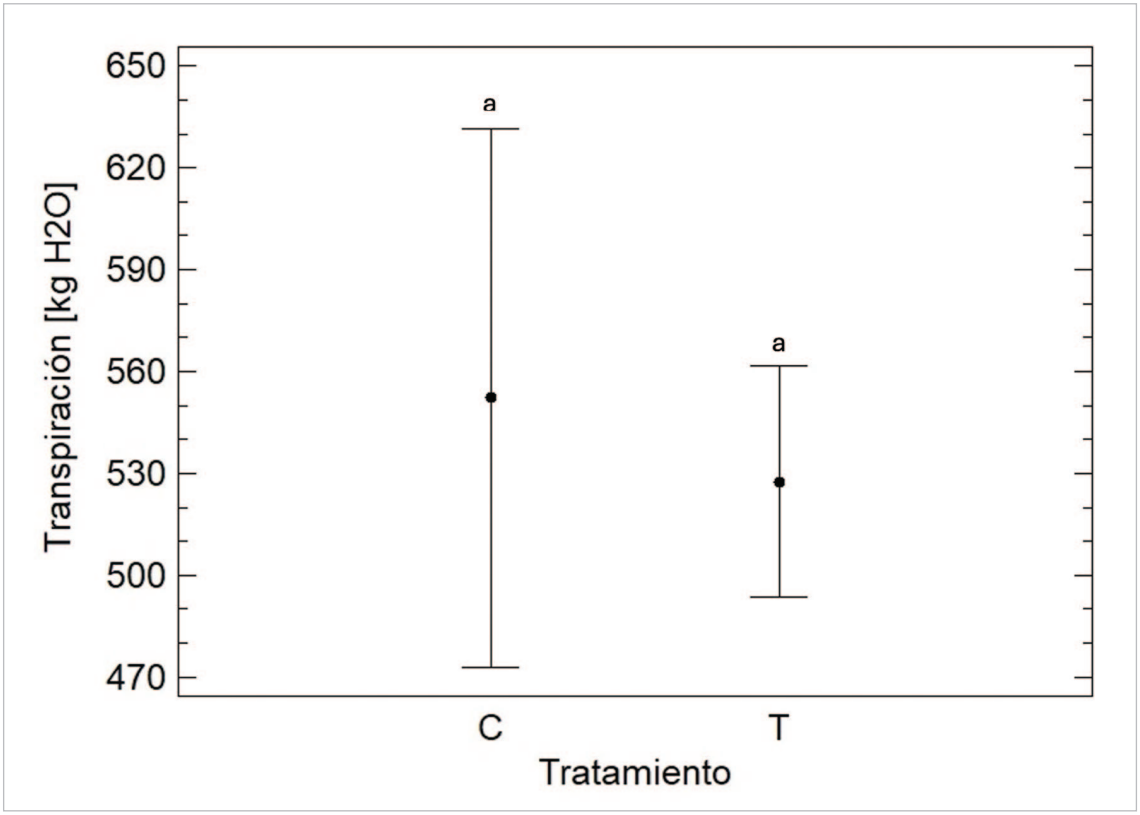


Figura 6. Transpiración acumulada (kg H_2O) por árbol en las zonas control y tratamiento, en los 218 días que duró el experimento (desde julio de 2023 hasta febrero de 2024)

Tabla 5. Resumen estadístico para la transpiración por hectárea [kg H_2O $día^{-1}$] obtenida en las 4 parcelas muestreadas.

TRATAMIENTO	n	Promedio	Desv. estándar	Coef. variación	Mínimo	Máximo	Rango
C	2	552	110	20	473	632	158
T	2	528	48	9	494	562	68
TOTAL	4	540	70	13	473	632	158

4. Discusión

En este estudio se comprobó que los tratamientos de gestión adaptativa de las masas jóvenes regeneradas post incendio tuvo un efecto positivo en el crecimiento de los individuos de pino carrasco y en el flujo de savia a nivel árbol. A nivel de rodal, el tratamiento no supuso cambios significativos. Reducir el número de brinzales y matorral en esta zona permitió a los individuos restantes utilizar toda el agua disponible, lo que se tradujo en que no hubiese un cambio significativo en la transpiración a nivel de rodal a cambio de incrementar el crecimiento y resiliencia de la masa remanente, evitando la mortalidad de individuos.

Aunque no existen muchas investigaciones realizadas en esta especie en climas similares, estos resultados concuerdan con los resultados aportados por otros autores que realizaron estudios similares en especies como *Pinus nigra* Arn. y *Quercus suber* L. (Martín *et al.*, 2009; Vázquez-Piqué *et al.*, 2009, respectivamente). Por otro lado, estudios llevados a cabo sobre masas adultas de pino carrasco sometidas a tratamientos de aclareo revelaron un efecto positivo sobre su crecimiento (Navarro *et al.*, 2010; Tsamir *et al.*, 2019). Aunque la respuesta del crecimiento en escenarios con episodios de sequía va a depender de múltiples factores como la intensidad y frecuencias del clareo o la edad a la que se realiza el primer clareo, se ha visto que en *Pinus sylvestris* L. los clareos mejoraron la recuperación del crecimiento tras épocas de sequía, pero esto afectó a su resistencia a la sequía (del Río *et al.*, 2017). Estos hallazgos nos permiten concluir que los tratamientos aplicados tuvieron un impacto directo en el desarrollo de los árboles durante el breve periodo de estudio, lo cual es consistente con los resultados obtenidos por otros investigadores en entornos y especies similares (Martín *et al.*, 2009).

Al disminuir el número de pies ha^{-1} con los tratamientos de clareo, la transpiración aumenta, probablemente a consecuencia de una disminución de la competencia por los recursos hídricos, lo que permite un uso más eficiente del agua y un incremento en la productividad. En zonas templadas, también se han realizado estudios que examinan la relación entre los clareos y la transpiración de las masas forestales. Por ejemplo, Sun *et al.* (2014) llevaron a cabo una investigación similar con *Chamaecyparis obtusa* Endl. y *Cryptomeria japonica* D. Don., observando un aumento en la transpiración de estas especies tras un tratamiento de clareo, resultados que son consistentes con los hallazgos de otros estudios como los de del Campo *et al.* (2022), Wang *et al.* (2019), Martínez-Núñez *et al.* (2023) y Jiménez Rubio (2019), que también observaron un aumento en el flujo de savia y una disminución en la transpiración total en las zonas clareadas. En contraste, otros estudios no constataron aumentos significativos en la transpiración tras la realización de clareos (Reid *et al.*, 2006; Gebauer *et al.*, 2011). Esto puede ser debido a que dichos estudios se llevaron a cabo en zonas con un clima continental húmedo, donde el agua no es un factor limitante.

5. Conclusiones

Los tratamientos de gestión adaptativa aplicados a las masas jóvenes de pino carrasco post incendio han demostrado tener un efecto positivo en el crecimiento de los árboles y en el flujo de savia a nivel individual. Sin embargo, se observó una ligera disminución de la transpiración a nivel de rodal, lo cual puede atribuirse a la menor densidad de árboles en las parcelas tratadas, reduciendo así la competencia por recursos como luz solar, agua y nutrientes.

Estos resultados son consistentes con estudios previos en especies y entornos similares, como *Pinus nigra* y *Quercus suber*, y en masas adultas de pino carrasco, donde los tratamientos de clareo también mostraron efectos positivos en el crecimiento. Además, se ha observado que los clareos pueden mejorar la recuperación del

crecimiento tras episodios de sequía, aunque esto puede afectar su resistencia a la sequía.

En climas mediterráneos, donde el agua es un factor limitante, se ha documentado que la transpiración a nivel de rodal es menor en zonas clareadas, lo cual coincide con nuestros hallazgos. La menor densidad de árboles tras el clareo parece aumentar la disponibilidad de recursos, favoreciendo el crecimiento radial y el flujo de savia a nivel individual, mientras que la transpiración total disminuye debido a la menor densidad de árboles.

En resumen, los tratamientos de clareo y gestión adaptativa han mostrado ser efectivos para mejorar el crecimiento y el flujo de savia en pino carrasco, con una ligera reducción en la transpiración a nivel de rodal que favorece el balance hídrico local. Estos hallazgos son relevantes para la gestión forestal en climas mediterráneos y pueden contribuir a estrategias de manejo más eficientes y sostenibles.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto nacional ALLEGRO-ALEPPO "Respuesta adaptativa de la gestión del pino carrasco al cambio climático. Mejorando la Productividad y la eficiencia del uso del agua" (PID2020-119861RB-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033).

7. Bibliografía

André-Alphonse, T.; Ghotsa Mekontchou, C.; Rochon, P.; Doyon, F.; Maheu, A.; (2023). Comparing the influence of thinning treatments with low to high residual basal area on red maple transpiration in a temperate mixed forest. *Forest Ecology and Management*. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120857

Cermák, J.; Jeník, J., Kucera, J.; zídek, V.; (1984). Xylem water flow in a crack willow tree (Salix fragilis L.) in relation to diurnal changes of environment. *Oecologia*. https://doi.org/10.1007/BF00376862

Cermák, J.; Kucera, J.; Nadezhdina, N.; (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. In *Trees - Structure and Function*. https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6

del Campo, A.D.; González-Sanchis, M.; García-Prats, A.; Ceacero, C.J.; Lull, C.; (2019). The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.016

del Campo, A.D.; Otsuki, K.; Serengil, Y.; Blanco, J.A.; Yousefpour, R.; Wei, X.; (2022). A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. In *Forest Ecology and Management*. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.12 0324

del Río, M.; Bravo-Oviedo, A.; Pretzsch, H.; Löf, M.; Ruiz-Peinado, R.; (2017). A review of thinning effects on scots pine stands: From growth and yield to new challenges under global change. In *Forest Systems*. https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11325

García Matallana, R.; Lucas-Borja, M.E.; Gómez-Sánchez, M.E.; Uddin, S.M.M.; Zema, D.A.; (2022). Post-fire restoration effectiveness using two soil preparation techniques and different shrubs species in pine forests of South-Eastern Spain. *Ecological Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106579

Gebauer, R.; Volarík, D.; Urban, J.; Børja, I.; Nagy, N.E.; Eldhuset, T.D.; Krokene, P.; (2011). Effect of thinning on anatomical adaptations of Norway spruce needles. *Tree Physiology*. https://doi.org/10.1093/treephys/tpr081

Helman, D.; Osem, Y.; Yakir, D.; Lensky, I.M.; (2017). Relationships between climate, topography, water use and productivity in two key Mediterranean forest types with different water-use strategies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 319–330. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.018

Iida, S.; Noguchi, S.; Levia, D.F.; Araki, M.; Nitta, K.; Wada, S.; Narita, Y.; Tamura, H.; Abe, T.; Kaneko, T.; (2024). Effects of forest thinning on sap flow dynamics and transpiration in a Japanese cedar forest. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169060

Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F.; (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130

Liu, X.; Sun, G.; Mitra, B.; Noormets, A.; Gavazzi, M.J.; Domec, J.C.; Hallema, D.W.; Li, J.; Fang, Y.; King, J.S.; McNulty, S.G.; (2018). Drought and thinning have limited impacts on evapotranspiration in a managed pine plantation on the southeastern United States coastal plain. *Agricultural and Forest Meteorology*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06 .025

Lombardi, D.; Micalizzi, K.; Vitale, M.; (2023). Assessing carbon and water fluxes in a mixed Mediterranean protected forest under climate change: An integrated bottom – up and top – down approach. *Ecological Informatics*. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102318

López Serrano, F.R.; Rubio, E.; García Morote, F.A.; Andrés Abellán, M.: Picazo Córdoba, M.I.; García Saucedo, F.; Martínez García, E.; Sánchez García, J.M.; Serena Innerarity, J.; Carrasco Lucas, L.; García González, O.; García González, J.C.; (2022). Artificial intelligence-based software (AID-FOREST) for tree detection: A new framework for fast and accurate forest inventorying using LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103014

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*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138536

Martínez-Núñez, E.; Castellanos, A.E.; Basant, S.; Ortega, C.; Wilcox, B.P.; Yépez, E.A.; Rodríguez, J.C.Y.; Romo-León, J.R.; (2023). DIFFERENT STRATEGIES IN SAP FLOW DYNAMICS AND HYDROLOGICAL NICHE OF DOMINANT SONORAN DESERT TREES ENABLE THEIR COEXISTENCE. *Botanical Sciences.*

Moya, D.; Espelta, J.M.; Verkaik, I.; López-Serrano, F.; De Las Heras, J.; (2007). Tree density and site quality influence on Pinus halepensis Mill. reproductive characteristics after large fires. *Annals of Forest Science*. https://doi.org/10.1051/forest:2007043

Navarro, F.B.; Jiménez, M.N.; Cañadas, E.M.; Gallego, E.; Terrón, L.; Ripoll, M.A.; (2010). Efectos de diferentes intensidades de clareo en el crecimiento arbóreo y en la productividad del sotobosque en una forestación semiárida de *Pinus halepensis* Mill. *Forest Systems*. https://doi.org/10.5424/fs/2010193-8858

Palmero-Iniesta, M.; Domènech, R.; Molina-Terrén, D.; Espelta, J.M.; (2017). Fire behavior in Pinus halepensis thickets: Effects of thinning and woody debris decomposition in two rainfall scenarios. *Forest Ecology and Management*. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.043

Reid, D.E.B.; Sillins, U.; Lieffers, V.J.; (2006). Sapwood hydraulic recovery following thinning in lodgepole pine. *Annals of Forest Science*. https://doi.org/10.1051/forest:2006013

Senf, C.; Buras, A.; Zang, C.S.; Rammig, A.; Seidl, R.; (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1

Simonin, K.; Kolb, T.E.; Montes-Helu, M.; Koch, G.W.; (2007). The influence of thinning on components of stand water balance in a ponderosa pine forest stand during and after extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.01.003

Sun, X.; Onda, Y.; Otsuki, K.; Kato, H.; Hirata, A.; Gomi, T.; (2014). The effect of strip thinning on tree transpiration in a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.011

Tsamir, M.; Gottlieb, S.; Preisler, Y.; Rotenberg, E.; Tatarinov, F.; Yakir, D.; Tague, C.; Klein, T.; (2019). Stand density effects on carbon and water fluxes in a semi-arid forest, from leaf to stand-scale. *Forest Ecology and Management*. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117573

Wang, Y.; Wei, X.; del Campo, A.D.; Winkler, R.; Wu, J.; Li, Q.; Liu, W.; (2019). Juvenile thinning can effectively mitigate the effects of drought on tree growth and water consumption in a young Pinus contorta stand in the interior of British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117667