



9CFE-1515

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





Estudio de la interacción entre la silvicultura y el clima en el crecimiento de repoblaciones de pinos ibéricos

MORENO-FERNÁNDEZ, D. (1), SANZ, R. (1,2), DEL RÍO, M. (1), RUIZ-PEINADO, R. (1), ALBERDI, I. (1) y CAÑELLAS, I. (1)

(1) Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA, CSIC). Crta A Coruña km 7,5. 28040 Madrid

(2) ETS Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Calle de José Antonio Novais 10. 28040 Madrid

Resumen

Las claras son una herramienta clave tanto para obtener recursos forestales madereros anticipados antes de la finalización del turno como para reducir el impacto de cambio climático. En este trabajo se evalúa el efecto de las claras y del clima, así como su interacción en el crecimiento secundario. Para tal fin se consideran distintos ensayos de claras instalados en pinares ibéricos de *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*. En cada ensayo se evalúan varios tratamientos de claras clasificados en función del área basimétrica extraída. Los ensayos se instalaron entre 1982-2004 y se han inventariado periódicamente hasta la actualidad. El análisis estadístico de los datos se ha llevado a cabo usando modelos mixtos con medidas repetidas, considerando como variable de estudio el incremento en diámetro y valorando el efecto de los tratamientos selvícolas en función del área basimétrica extraída y la interacción con el clima (precipitación y temperatura). La precipitación tiene una relación positiva con el crecimiento diametral mientras que la temperatura tiene un efecto negativo en el crecimiento diametral del árbol. Sin embargo, el grado de asociación del clima con el crecimiento diametral depende de la especie estudiada. Se confirma la idoneidad de las claras como medida de adaptación a las nuevas condiciones climáticas así como la necesidad de realizar estudios específicos de la respuestas de las distintas especies forestales a estos tratamientos.

Palabras clave

Adaptación, gestión forestal, mitigación, silvicultura.

1. Introducción

Las emisiones antropogénicas de CO₂ están acelerando los cambios en los regímenes térmicos e hídricos, superando la velocidad de alteración que ocurriría en condiciones naturales (SOLOMÓN *et al.*, 2009). Estos cambios están afectando al conjunto de los ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos (MALHI *et al.*, 2020), siendo la región mediterránea una de las más expuestas. A pesar del posible efecto fertilizador del CO₂ (MARTÍNEZ-VILALTA *et al.*, 2008; MADRIGAL-GONZÁLEZ *et al.*, 2015) y de mayores crecimientos ligados a periodos vegetativos más largos en zonas de alta montaña o en zonas boreales (JEONG *et al.*, 2011), el impacto del cambio climático en los bosques mediterráneos está siendo perjudicial debido al aumento progresivo de las temperaturas y de los eventos de sequías extremos (MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2022). Algunas de las consecuencias del cambio climático en estos sistemas son los fenómenos de mortalidad del arbolado adulto como consecuencia de las sequías o incendios forestales, mayores dificultades en el establecimiento de la regeneración, cambios de distribución de especies, así como fenómenos de extinción de especies (VERGARECHEA *et al.*, 2019; JONES *et al.*, 2020; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2022).

Bajo este contexto de cambio climático, se establece el marco de la gestión forestal sostenible para la mitigación y adaptación del cambio climático (KEENAN *et*



al., 2015). Las medidas de mitigación tienen por objetivo aumentar la captura de carbono en los bosques y la promoción de productos forestales de gran durabilidad derivados de la madera. En relación a la mitigación, algunas de las medidas de gestión consisten en la ampliación del turno o en el aumento de las existencias de madera en pie. Por su parte, la adaptación trata de promover estructuras forestales más resilientes frente al cambio climático. Dentro de las medidas de adaptación, se incluye la diversificación de las masas forestales o la optimización de los tratamientos selvícolas, tanto en las cortas de mejora o parciales como en las de regeneración (KEENAN *et al.*, 2015; CARTER *et al.*, 2024).

Uno de los tratamientos de mejora más relevantes son las claras, que tienen como objetivo tanto ajustar la espesura de la masa como anticipar la obtención de productos derivados de la madera (SERRADA, 2002; MÄKINEN & ISOMÄKI, 2004). La reducción de la espesura conlleva una reducción de la competencia por recursos subterráneos, es decir, agua y nutrientes, y un mayor acceso a la luz para los árboles en pie (AUSSENAC & GRANIER, 1988; SOHN *et al.*, 2016). De esta manera, el vigor y la salud de los árboles en pie se ven favorecidos al reducirse la competencia.

Existen diferentes medidas para evaluar el estado sanitario y el vigor de un árbol, siendo una de las principales su crecimiento diametral o secundario. En general, los pies que muestran un mayor crecimiento diametral suelen estar en mejores condiciones de salud (CAMARERO *et al.*, 2015). La información del efecto de las claras en el crecimiento secundario es muy amplia. Por lo general, se concluye que las masas aclaradas presentan mayores crecimientos, y por lo tanto son más vigorosas, que las masas más densas (MÄKINEN & ISOMÄKI, 2004; SOHN *et al.*, 2016; ALDEA *et al.*, 2017; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Sin embargo, la espesura no es el único elemento que modula el crecimiento diametral de los árboles en pie, sino que otros factores tales como la dominancia, la composición o la calidad de estación están involucrados en este proceso (PRETZSCH & SCHÜTLE, 2021; HEILMAN *et al.*, 2022; PRETZSCH *et al.*, 2022). Dentro de los componentes que determinan la calidad de estación, las propiedades del suelo suelen permanecer relativamente constantes a lo largo del tiempo mientras que las condiciones climáticas, tal y como se ha comentado antes, son cambiantes.

Por lo tanto, para poder definir estrategias efectivas de adaptación al cambio climático es necesario entender en profundidad tanto el comportamiento individual de cada uno de los factores involucrados en el crecimiento diametral como los efectos combinados de distintos factores.

Uno de los efectos combinados más relevantes es la interacción del clima con las claras. El análisis de esta interacción trata de evaluar si los efectos positivos de las claras aumentan, disminuyen o se mantienen constantes bajo condiciones climáticas adversas (SOHN *et al.*, 2016), generalmente caracterizadas por altas temperaturas y bajas precipitaciones anuales y/o estivales (MARTIN-BENITO *et al.*, 2011; SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2015; FERNÁNDEZ-DE-UÑA *et al.*, 2015). Por otro lado, la aridez parece jugar un papel importante en la interacción del clima con los tratamientos de claras. Por ejemplo, la disminución de la competencia para las especies que crecen en zonas áridas, donde alcanzan su límite ecológico, podría no ser suficiente para mitigar los efectos de la sequía (ELKIN *et al.*, 2015). Sin embargo, otros autores postulan que estas poblaciones podrían estar mejor adaptadas a la sequía, por lo que su respuesta a la reducción de competencia sería beneficiosa (TROUVÉ *et al.*, 2017). En este sentido, SOHN *et al.*, (2016) y MOREAU *et*

al., (2022) revisaron el efecto de las claras en la resiliencia de los bosques frente a la sequía y encontraron que la respuesta del crecimiento diametral frente a la sequía en masas aclaradas depende, en gran medida de la especie.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de las claras, del clima y de su interacción en el crecimiento secundario, es decir, diametral, de cuatro especies de pinos autóctonos de la Península Ibérica. Se espera un efecto positivo de la reducción de la competencia mediante las claras en el crecimiento secundario, así como una relación positiva de la precipitación y negativa de la temperatura con el crecimiento diametral. En cuanto a la interacción del clima con el tratamiento selvícola, se espera que, a pesar de que sea específica para cada especie, las claras reduzcan los efectos negativos de condiciones climáticas adversas.

3. Metodología

3.1. Descripción de los ensayos de claras

Se ha evaluado el efecto de las claras y del clima en el crecimiento diametral en cuatro ensayos de claras instalados en repoblaciones monoespecíficas de pino piñonero (*Pinus pinea* L.), pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.), pino laricio (*Pinus nigra* Arn.) y pino silvestre (*Pinus sylvestris* L):

- El ensayo del pino piñonero está localizado en el término municipal de Alcazarén (Valladolid). El área de estudio se encuentra a unos 740 m snm en terreno llano. Se evaluaron tres tratamientos: tratamiento control, clara moderada (10 % de área basimétrica extraída) y clara fuerte (30 % de área basimétrica extraída) en nueve parcelas de 2500 m². El dispositivo se instaló en 2004 cuando la masa tenía 20 años. Se han repetido los inventarios en el año 2008 y posteriormente hasta 2022, excepto en el año 2020.
- El ensayo de claras de pino resinero está ubicado en Fuencaliente (Ciudad Real). Las parcelas están aproximadamente a unos 900 m snm en pendientes del 15 al 20 % con orientación NE. Se instaló en 1984 cuando la masa tenía 33 años y consta de nueve parcelas de 1000 m² sobre las que se han evaluado tres tratamientos: tratamiento control, clara moderada (30 % de área basimétrica extraída) y clara fuerte (40 % de área basimétrica extraída). Los inventarios se han repetido periódicamente cada cuatro o cinco años hasta 2015.
- El ensayo de claras de pino silvestre está localizado en Villasur de los Herreros (Burgos), a unos 1200 m snm sobre unas pendientes del 5%. En 1982 se evaluaron tres tratamientos: clara moderada (10 % de área basimétrica extraída), fuerte (23 % de área basimétrica extraída) y control en nueve parcelas de 1000 m². En el año de la instalación del experimento, la masa tenía 22 años. Los inventarios se han repetido aproximadamente cada cinco años hasta 2020.
- El dispositivo de claras de pino laricio se encuentra en Guadalajara, en el término municipal de Zarzuela de Jadraque, aproximadamente a 1050 m snm en una zona de bajas pendientes. En 1993, se evaluaron dos tratamientos, clara fuerte (40 % de área basimétrica extraída) y control en ocho parcelas de 1000 m². En el momento de la instalación, la masa tenía 26 años. Los inventarios se han repetido cada cinco años hasta 2021.

En los tratamientos control no se corta ningún árbol y la reducción de densidad se debe a mortalidad natural. Además, las claras tienen una periodicidad aproximada de 10 – 15 años y siempre se ejecutan por lo bajo (Figura 1). En el año de la

instalación, se identificaron todos los árboles con diámetro normal mayor de 7,5 cm y se registró el diámetro. En los sucesivos inventarios se midieron los diámetros de los árboles vivos y se registraron los árboles muertos. Esto permite calcular para cada periodo (años entre inventarios) el crecimiento diametral anual de cada árbol (cto, en cm/año) como el cociente de la diferencia entre el diámetro entre inventarios consecutivos y el periodo (número de años) entre dos inventarios consecutivos (Tabla 1).

Tabla 1. Valores medios del crecimiento diametral (cm/año) y desviación típica entre paréntesis para los cuatro ensayos de claras.

Ensayo	Control	Moderada	Fuerte
Pino piñonero	0,42 (0,43)	0,57 (0,52)	0,64 (0,50)
Pino resinero	0,23 (0,27)	0,45 (0,39)	0,51 (0,42)
Pino silvestre	0,28 (0,23)	0,40 (0,24)	0,46 (0,24)
Pino laricio	0,17 (0,15)	-	0,30 (0,15)

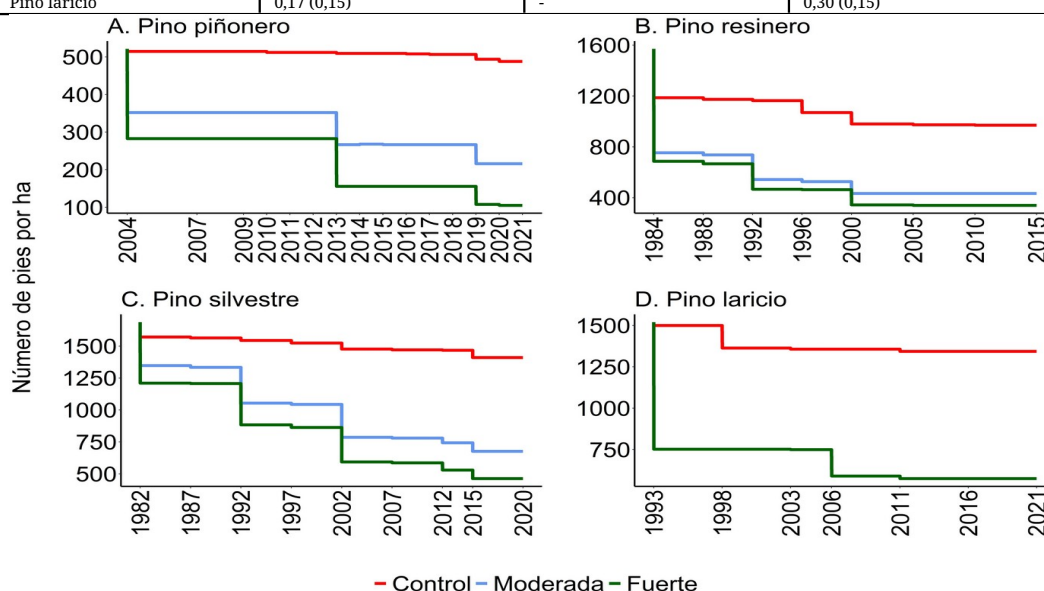


Figura 1. Valores medios de la densidad (pies por hectárea) por tratamiento, año de inventario y ensayo de claras.

Con estos datos, se han obtenido dos variables a nivel de árbol individual que se utilizarán en la modelización del crecimiento diametral: i) dap [cm], diámetro a la altura del pecho al comienzo de cada periodo entre inventarios como medida del tamaño del árbol y ii) dap_Dg, el ratio entre dap y el diámetro medio cuadrático de la parcela al principio del periodo como medida de la posición social del árbol dentro de la parcela.

3.2. Datos climáticos

Las variables climáticas han sido obtenidas de la base de datos climáticos de reanálisis ERA5 (HERSBACH *et al.* 2023). Esta base de datos dispone de registros mensuales de distintas variables climáticas desde 1940 hasta la actualidad. Para este trabajo, se ha seleccionado la temperatura a dos metros sobre el suelo y la precipitación total y se han transformado a °C y a mm, respectivamente (Figura 2).

Estas dos variables se han agrupado en variables anuales (temperatura media anual y precipitación total acumulada) y estacionales considerando que el invierno

está compuesto por los meses de diciembre del año anterior, enero y febrero; primavera por marzo, abril y mayo; verano por junio, julio y agosto; y, finalmente, otoño por septiembre, octubre y noviembre.

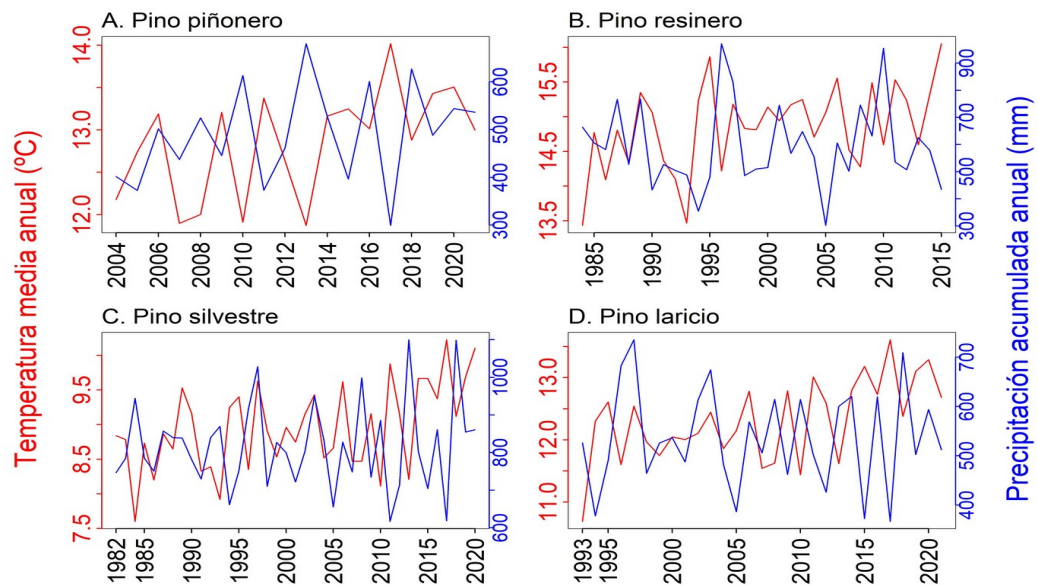
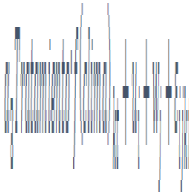
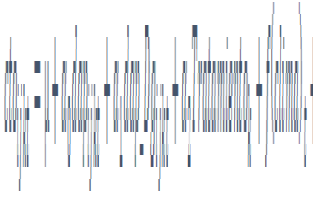


Figura 1. Valores medios de la densidad (pies por hectárea) por tratamiento, año de inventario y ensayo de claras.

Sin embargo, la mayoría de los inventarios de los ensayos no se llevan a cabo anualmente, sino que la periodicidad de las repeticiones tiende a ser de cinco años. Por lo tanto, cada una de estas variables climáticas fueron promediadas para el periodo entre remediciones teniendo en cuenta la época del año en la que se realizan los inventarios. Así, por ejemplo, cuando los inventarios se hacen en otoño del año t , las variables climáticas empiezan a computar a partir del año $t+1$ debido a que el crecimiento diametral del año t ya ha finalizado. Sin embargo, cuando los inventarios se realizan en primavera del año t se incluyen las variables climáticas correspondientes al año t debido a que el crecimiento aún no ha comenzado. Por lo tanto, para cada periodo entre inventarios forestales, se han considerado las siguientes variables climáticas: i) precipitación total anual, ii) precipitación de invierno, iii) precipitación de primavera, iv) precipitación de verano, v) precipitación de otoño, vi) temperatura media anual, vii) temperatura media de invierno, viii) temperatura de primavera, ix) temperatura de verano y x) temperatura de otoño. Las variables de precipitación vienen dadas en mm y las de temperatura en °C.

3.3. Análisis estadístico

La evaluación del efecto del clima, de las claras y de su interacción en el crecimiento diametral anual de cada árbol para las cuatro especies de estudio se ha llevado a cabo usando modelos lineales mixtos con la siguiente estructura:



(1)

donde

cto_{ijkt}

es el crecimiento diametral en cm/año del árbol

i

, situado en la parcela

j

, sometida al factor

Tratamiento k

, en el periodo entre inventarios

t

.

μ

es término independiente del modelo mientras que

$f(\text{clima})_t$

es una combinación lineal de las distintas variables climáticas.

$\beta \text{Tratamiento} \cdot f(\text{clima})_{kt}$

representa la interacción del tratamiento con el clima y

u_i

y

w_j

son efectos aleatorios asociados al árbol y a la parcela, respectivamente.

α

se corresponde con los coeficientes de las distintas variables respuesta o

predictores. Finalmente,

ε_{ijklt}

es el error aleatorio del modelo. Para cada uno de los ensayos de claras se ha realizado la selección del modelo de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Selección de la estructura aleatoria del modelo. Se han comparado distintas formulaciones del modelo con efectos aleatorios, pero sin efectos fijos. Se ha seleccionado aquella formulación del modelo con menor Criterio de Información de Akaike (CIA).
2. Inclusión de variables de árbol (dap y dap_Dg). Se han incluido secuencialmente las dos variables y se ha comprobado que no hubiera problemas de correlación lineal entre ambos predictores mediante el factor de inflación de la varianza (FIV). En caso de aparecer problemas de correlación, se ha seleccionado la variable incluida el modelo con menor CIA.

3. Selección de las variables climáticas. Dado que las variables climáticas están fuertemente correlacionadas entre sí, se ha ajustado un modelo para cada una de las 10 variables climáticas incluyendo también la estructura aleatoria y las variables de árbol seleccionadas. Una vez ajustados los 10 modelos, se ha seleccionado la variable de temperatura y de precipitación con menor CIA. Además, se ha evaluado la inclusión de otras variables según orden de importancia de acuerdo al CIA. Sin embargo, esto solía conducir a un aumento del FIV o a que aquellas variables con CIA superior al mínimo solían tener el mismo sentido biológico que las variables con menor CIA absoluto. Este sería el caso de la precipitación anual y de la precipitación de verano.
4. Evaluación de la interacción del tratamiento con el clima. Una vez, fijada la formulación del modelo con efectos aleatorios, clima y tratamiento, se evaluaron distintas interacciones del clima con el tratamiento mediante el CIA y teniendo en cuenta el FIV.

Todas las variables predictoras continuas (variables de árbol y climáticas) se han estandarizado para facilitar la convergencia de los modelos. La comparación entre modelos con distintas estructuras se ha realizado ajustando los modelos mediante el método de máxima verosimilitud mientras que el modelo definitivo se ha ajustado mediante el método de máxima verosimilitud restringida. Se ha empleado el paquete DHARMa (HARTIG, 2023) para el diagnóstico de los residuos de los modelos y para abordar la evaluación de las distintas asunciones de los modelos lineales. El ajuste de los modelos se ha realizado con el paquete glmmTMB (BROOKS *et al.*, 2017) de R 4.4.1. (R CORE TEAM, 2024). Finalmente, se ha llevado a cabo el test de *post-hoc* de Tukey para evaluar posibles diferencias entre tratamientos.

4. Resultados

Se ha encontrado un efecto significativo ($p < 0,05$) del factor Tratamiento en el crecimiento diametral de todas las especies. El test de Tukey revela que para todas las especies las parcelas control presentan crecimientos diametrales significativamente inferiores a las parcelas aclaradas. Además, los árboles situados en las parcelas con claras fuertes crecen más que los árboles de las parcelas con clara moderada en los ensayos del pino silvestre y del pino resinero. Sin embargo, la diferencia entre las distintas claras tiende a atenuarse para el caso del pino piñonero (Tabla 2). Además, para todas las especies se ha encontrado un efecto positivo de la variable *dap_Dg* en el crecimiento diametral (Tabla 3). Esto sugiere que los árboles más dominantes de la parcela tienden a tener mayores crecimientos diametrales.

Tabla 2. Resultado del test de Tukey para el factor tratamiento en los distintos ensayos de claras.

Contraste	Estimación	p-valor
Pino piñonero		
Control - Moderada	-0,1410	0,0190
Control - Fuerte	-0,2085	0,0002
Moderada - Fuerte	-0,0675	0,4057
Pino resinero		
Control - Moderada	-0,212	<0,001
Control - Fuerte	-0,270	<0,001

Contraste	Estimación	p-valor
Moderada - Fuerte	-0,058	<0,001
Pino silvestre		
Control - Moderada	-0,0918	<0,001
Control - Fuerte	-0,1432	<0,001
Moderada - Fuerte	-0,0514	<0,001
Pino laricio		
Control - Fuerte	-0,1180	<0,001

Tabla 3. Formulación de los modelos para los cuatro ensayos de claras. Moderada y Fuerte se refieren a los tratamientos de claras. Temp = temperatura anual media. Precip = precipitación anual acumulada. ver = meses de verano (junio, julio y agosto). inv = meses de invierno (enero, febrero y diciembre del año anterior). Es necesario tener en cuenta que todas las variables continuas están estandarizadas.

Especie	Modelo
Pino piñonero	$Cto = 0,43 + 0,01 \cdot dap_Dg + 0,14 \cdot Moderada + 0,21 \cdot Fuerte - 0,17 \cdot Temp + 0,1 \cdot Temp \cdot Moderada + 0,06 \cdot Temp \cdot Fuerte + 0,01 \cdot Precip + 0,09 \cdot Precip \cdot Moderada + 0,06 \cdot Precip \cdot Fuerte$
Pino resinero	$Cto = 0,23 + 0,06 \cdot dap_Dg + 0,21 \cdot Moderada + 0,27 \cdot Fuerte + 0,06 \cdot Temp.inv + 0,08 \cdot Temp.inv \cdot Moderada - 0,14 \cdot Temp.inv \cdot Fuerte - 0,04 \cdot Temp.ver - 0,02 \cdot Temp.ver \cdot Moderada - 0,04 \cdot Temp.ver \cdot Fuerte + 0,09 \cdot Precip.inv + 0,07 \cdot Precip.inv \cdot Moderada + 0,06 \cdot Precip.inv \cdot Fuerte$
Pino silvestre	$Cto = 0,29 + 0,05 \cdot dap_Dg + 0,09 \cdot Moderada + 0,14 \cdot Fuerte - 0,03 \cdot Temp + 0,01 \cdot Temp \cdot Moderada + 0,02 \cdot Temp \cdot Fuerte + 0,08 \cdot Precip.ver$
Pino laricio	$Cto = 0,17 + 0,05 \cdot dap_Dg + 0,12 \cdot Fuerte - 0,03 \cdot Temp - 0,01 \cdot Temp \cdot Fuerte + 0,02 \cdot Precip + 0,02 \cdot Precip \cdot Fuerte$

En el caso del pino piñonero, se ha detectado un efecto significativo y negativo de la temperatura media anual así como una relación positiva y significativa de la precipitación anual con el crecimiento diametral anual (Tabla 3). En cuanto a la interacción entre el clima y el tratamiento, los tests estadísticos revelan una interacción significativa entre el tratamiento y las dos variables climáticas señaladas. La exploración de las interacciones revela que las claras modifican el efecto del clima en el crecimiento diametral de las claras. Por ejemplo, el efecto negativo del aumento de las temperaturas es menor con claras (Figura 3A). Sin embargo, cuando la precipitación anual es extremadamente baja el efecto de las claras se diluye (Figura 3B).

El modelo final para el pino resinero incluye las siguientes variables climáticas: temperatura de los meses de invierno (efecto positivo en el crecimiento diametral anual), temperatura de los meses de verano (efecto negativo) y precipitación de los meses de invierno (efecto positivo) (Tabla 3). Además, se ha encontrado efectos estadísticamente significativos de la interacción de las tres variables climáticas con el tratamiento. Las claras reducen el efecto negativo de las altas temperaturas de verano (Figura 3C). En el caso de la temperatura de invierno, los efectos de las claras son más evidentes cuando las temperaturas son mayores (Figura 3D). Lo mismo ocurre con la precipitación de invierno, los árboles localizados en parcelas aclaradas presentan mayores crecimientos diametrales cuando las precipitaciones de invierno son mayores (Figura 3E).

Se ha encontrado un efecto negativo de la temperatura anual en el crecimiento diametral del pino silvestre en Villasur de los Herreros. Para este ensayo de claras, también se ha detectado una relación positiva entre la precipitación de verano y el

crecimiento (Tabla 3). En cuanto a la interacción clima y tratamiento, únicamente entran en el modelo de forma significativa la interacción del tratamiento con la temperatura anual. La exploración de la interacción revela que el efecto de las claras aumenta cuando las temperaturas se maximizan (Figura 3F).

Finalmente, para el pino laricio, se ha encontrado una relación positiva de la precipitación anual en el crecimiento diametral, así como una asociación negativa de la temperatura anual media con el crecimiento diametral de este pino (Tabla 3). Además, estas dos variables interaccionan significativamente con el tratamiento. En condiciones adversas, es decir, poca precipitación y altas temperaturas, las parcelas aclaradas presentan mayor crecimiento diametral que las parcelas control (Figura 3G y 3H).

5. Discusión

Se ha encontrado un efecto significativo y positivo de las claras en el crecimiento secundario en las cuatro especies de pinos estudiadas en este trabajo. Este resultado está en consonancia con la mayor parte de la literatura científica (MÄKINEN & ISOMÄKI, 2004; ALDEA *et al.*, 2017; DEL RÍO *et al.*, 2017). De acuerdo de lo esperado (MÄKINEN & ISOMÄKI, 2004; SOHN *et al.*, 2016; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2020), las diferencias estadísticas entre las claras moderada y fuerte han sido estadísticamente significativas tanto para el pino silvestre como para el pino resinero, pero no así para el pino piñonero. Esto puede deberse a que la diferencia entre los pesos de los distintos tratamientos de claras en el piñonero no es suficiente para detectar diferencias significativas en el crecimiento diametral o a que, en los niveles de espesura fijados en ambos tratamientos de claras, la espesura ya no actúa como un factor limitante para el crecimiento diametral o secundario.

La relación positiva de la posición del árbol o dominancia, evaluada a través del cociente del diámetro del árbol y del diámetro cuadrático medio, en el crecimiento secundario de las cuatro especies estudiadas indica que los árboles dominantes presentan mayores crecimientos diametrales. Los árboles dominantes y codominantes tienen mayor acceso tanto a recursos subterráneos como a luz que los dominados y los suprimidos. Nuestros resultados concuerdan con aquellos obtenidos para especies mediterráneas tales como el pino piñonero (CALAMA *et al.*, 2005), el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill. CONDÉS & STERBA, 2008), el pino silvestre y el pino laricio (MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2014), para masas atlánticas de pino resinero y de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don; HEVIA *et al.*, 2016) así como para distintas especies ibéricas creciendo en masas mixtas (RODRÍGUEZ DE PRADO *et al.*, 2022). Por otro lado, aunque no se ha evaluado en este estudio, la relación de la posición social del árbol dentro de la parcela con el crecimiento diametral puede variar con el clima, con la intensidad de eventos climáticos extremos y con la especie (ver la revisión de PRETZSCH *et al.*, 2022).

Tanto la relación positiva de la precipitación con el crecimiento diametral como la asociación negativa de la temperatura de verano o anual con el crecimiento diametral son comunes en sistemas forestales mediterráneos y están asociadas con la evotranspiración y con la disponibilidad de agua para la xilogénesis y la formación del floema (ARZAC *et al.*, 2008; VIEIRA *et al.*, 2014; FERNÁNDEZ-DE-UÑA *et al.*, 2015; DESLAURIERS *et al.*, 2017; FYLLAS *et al.*, 2017). En línea con nuestros resultados, trabajos previos han encontrado que el crecimiento secundario del pino laricio está marcadamente limitado por la humedad de los meses de verano (MARTIN-BENITO *et al.*, 2011; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2014; FYLLAS *et al.*



et al., 2017) y el del pino silvestre por la temperatura anual y la precipitación anual y estival (MARTÍNEZ-VILALTA, B.C. *et al.*, 2008; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2014; SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2015). En el caso del pino piñonero, la relación entre el clima y el crecimiento diametral tiene una variación espacial relevante (NATALINI *et al.*, 2016, CALAMA *et al.*, 2019). Algunas de las variables que han sido vinculadas con el crecimiento diametral de esta especie en la bibliografía son la precipitación de primavera y la anual y la temperatura media anual. Debido a la amplia distribución geográfica en la Península Ibérica del pino resinero, la relación del clima con el crecimiento diametral tiene una marcada componente espacial (MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2024), siendo relevantes los componentes de la temperatura y la precipitación (SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2015; CHARRU *et al.*, 2017; CALAMA *et al.*, 2024; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2024).

Por otro lado, el efecto positivo de la temperatura de invierno en el crecimiento diametral del pino resinero podría estar relacionado con mayores tasas de fotosíntesis durante el invierno y mayor acumulación de carbohidratos así como con una ampliación del periodo vegetativo (LEBOURGEOIS, 2000; GIMENO *et al.*, 2012; GRANDA *et al.*, 2015). Este efecto positivo de la temperatura de invierno y primavera en el crecimiento diametral se ha encontrado en poblaciones de coníferas del norte y del centro de Europa (HARVEY *et al.*, 2019) y para el pino silvestre y el pino laricio en el centro de la Península Ibérica (MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2014; SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2015). Sin embargo, cuando el incremento de la temperatura de invierno viene acompañado de una disminución de la precipitación, aumenta la evotranspiración y el estrés hídrico al final de la primavera, lo cual se traduce en una disminución del crecimiento diametral (CAMARERO *et al.*, 2018; MARQUÉS *et al.*, 2018; DÍAZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2023). Además, en ambientes mediterráneos la relación entre la temperatura de verano y el crecimiento diametral varía según la localización espacial de los rodales (TOUCHAN *et al.*, 2017). Esta variación espacial también incluye patrones altitudinales, en los que el crecimiento secundario en las poblaciones situadas a mayor altitud y con menor déficit hídrico, se ve favorecido por el aumento de las temperaturas de invierno (SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2015).

La relación positiva entre la precipitación de invierno y el crecimiento secundario del pino resinero ha sido descrita en trabajos anteriores y se asocia a la relevancia de la recarga de agua durante el invierno (MAZZA *et al.*, 2014; NATALLINI *et al.*, 2016; CALAMA *et al.*, 2019). Esta recarga se traduce en una mayor disponibilidad de agua durante la primavera y el verano (GOLDSMITH *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2022), lo cual impacta positivamente en el crecimiento del arbolado.

Nuestros resultados indican que el efecto de la interacción en el crecimiento diametral varía entre las distintas especies. Esto sugiere que la respuesta de crecimiento diametral durante períodos secos en masas aclaradas es específica de cada especie (SOHN *et al.* (2016); MOREAU *et al.* (2016)). Sin embargo, debido a que únicamente se dispone de un único ensayo de claras por especie, no se puede afirmar rotundamente si el efecto de las interacciones es específico para cada especie o existe algún otro efecto relacionado con la estación. En el caso del pino piñonero y pino resinero, nuestros resultados indican que cuando las condiciones climáticas son más desfavorables (mayor temperatura anual y menor precipitación), el efecto de competencia, evaluada a través de las claras, a pesar de no desaparecer, pasa a segundo plano. En el caso de precipitaciones bajas en resinero y laricio las claras mantienen un mayor crecimiento, lo que puede ser clave para mantener el vigor del árbol. En su revisión sistemática MOREAU *et*



al. (2022) encontraron que, en líneas generales, aunque con excepciones (e.g., MAUSOLF *et al.*, 2018), las masas aclaradas son más resistentes y resilientes a eventos de sequía que masas no aclaradas. Sin embargo, en masas mediterráneas de pino piñonero (CALAMA *et al.*, 2019) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd., MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2020) se ha encontrado que cuando las condiciones son extremadamente desfavorables, el efecto de las claras tiende a diluirse.

La principal limitación del trabajo es que los datos provienen de inventarios dasométricos repetidos, en su mayoría, cada cinco o diez años. Este hecho hace que tanto los crecimientos diametrales como las variables climáticas estén agregadas lo cual imposibilita la evaluación de correlaciones anuales del crecimiento diametral con el clima, ni la identificación del efecto de eventos extremos en el crecimiento diametral. Otra consecuencia de la estructura de los datos es que no se pueden calcular índices de resiliencia (resiliencia, resistencia y recuperación) en los años con condiciones climáticas más adversas (LLORET *et al.*, 2011). Estos índices son especialmente relevantes para comprender en mayor profundidad cómo responden los bosques a eventos de sequía (VERGARECHEA *et al.*, 2021; MORENO-FERNÁNDEZ *et al.*, 2022). Para tal fin, los datos de testigos (*cores*) o de dendrómetros son más adecuados (SOHN *et al.*, 2016) debido a que presentan resolución anual o incluso interanual (ALDEA *et al.*, 2017).

6. Conclusiones

El crecimiento diametral de las especies estudiadas está modulado tanto por la espesura, regulada por las claras, como por el clima. Ambas variables interactúan significativamente de tal forma que, en la mayoría de los casos, el efecto positivo de las claras en el crecimiento diametral se reduce, aunque no desaparece completamente, cuando las condiciones climáticas son adversas. Por lo tanto, se recomienda la ejecución de claras como medida de adaptación al cambio climático aunque en años de sequía extrema su efecto puede verse diluido.

7. Agradecimientos

Queremos agradecer a todo el personal que se ha encargado del diseño, mantenimiento y remediciones de los distintos ensayos de claras, especialmente a Ángel Bachiller y Estrella Viscasillas así como al personal de las distintas Comunidades Autónomas que han permitido y apoyado el establecimiento de parcelas permanentes en sus territorios. Este trabajo ha sido financiado por los siguientes proyectos: i) FN-2021. Monitorización de la red de parcelas permanentes de Gestión Forestal y tratamientos selvícolas del CIFOR-INIA, ii) Pathfinder UE HORIZON (101056907) iii) Proyecto IMFLEX PID2021-126275OB-C21 de investigación financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa.

8. Bibliografía

- ALDEA, J.; BRAVO, F.; BRAVO-OVIEDO, A.; RUIZ-PEINADO, R.; RODRÍGUEZ, F.; DEL RÍO, M.; 2017. Thinning enhances the species-specific radial increment response to drought in Mediterranean pine-oak stands. *Agr For Meteo*, 371-383.
- ARZAC, A.; ROZAS, V.; ROZENBERG, P.; OLANO, J.M.; 2018. Water availability controls *Pinus pinaster* xylem growth and density: a multi-proxy approach along its environmental range. *Agric For Meteorol* 250-251, 171-180.
- AUSSENAC, G.; GRANIER, A.; 1988. Effects of thinning on water-stress and growth in Douglas-fir. *Can J For Res-Rev Can Rech For* 18, 100-105.
- BROOKS, M. E.; KRISTENSEN, K.; VAN BENTHEM, K. J.; MAGNUSSON, A.; BERG, C.



W.; NIELSEN, A.; SKAUG, H. J.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B. M.; 2017. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9, 378–400.

CALAMA, R.; CONDE, M.; DE-DIOS-GARCÍA, J.; MADRIGAL, G.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; GORDO, F.J.; PARDOS, M.; 2019. Linking climate, annual growth and competition in a Mediterranean forest: *Pinus pinea* in the Spanish Northern Plateau. *Agr For Manag* 264, 309-321.

CALAMA, R.; MARTÍNEZ, C.; GORDO, J.; DEL RÍO, M.; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.; PARDOS, M.; 2024. The impact of climate and management on recent mortality in *Pinus pinaster* resin-tapped forests of inland Spain. *Forestry* 97, 120–132.

CAMARERO, J.J.; GAZOL, A.; SANGÜESA-BARREDA, G.; OLIVA, J.; VICENTE-SERRANO, S.M.; 2015. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *J Ecol*, 103: 44-57

CAMARERO, J. J.; GAZOL, A.; SANGÜESA-BARREDA, G.; CANTERO, A.; SÁNCHEZ-SALGUERO, R.; SÁNCHEZ-MIRANDA, A.; GRANDA, E.; SERRA-MALUQUER, X.; IBÁÑEZ, R.; 2018. Forest Growth Responses to Drought at Short- and Long-Term Scales in Spain: Squeezing the Stress Memory from Tree Rings. *Front Ecol Evol* 6: 9.

CARTER, E.; VON HEDEMANN, N.; SCHULTZ, C.; 2024. Climate change mitigation-adaptation relationships in forest management: perspectives from the fire-prone American West. *Reg Environ Change* 24, 95

CHARRU, M.; SEYNAVE, I.; HERVÉ, J.-C.; BERTRAND, R.; BONTEMPS, J.-D.; 2017. Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Ann For Sci*, 74, 3

CONDÉS, S.; STERBA, H.; 2008. Comparing an individual tree growth model for *Pinus halepensis* Mill. in the Spanish region of Murcia with yield tables gained from the same area. *Eur J For Res* 127, 253-261.

DESLAURIERS, A.; FONTI, P.; ROSSI, S.; RATHGEBER, C.B.K.; GRICAR, J.; 2017. Ecophysiology and Plasticity of Wood and Phloem Formation, 13–33.

DEL RÍO, M.; BRAVO-OVIEDO, A.; PRETZSCH, H.; RUIZ-PEINADO, R.; 2017. A review of thinning effects on Scots pine stands: From growth and yield to new challenges under global change. *Forest systems* 26, eR03S.

DÍAZ-MARTÍNEZ, P.; RUIZ-BENITO, P.; MADRIGAL-GONZÁLEZ, J.; GAZOL, A.; ANDIVIA, E.; 2023. Positive effects of warming do not compensate growth reduction due to increased aridity in Mediterranean mixed forests. *Ecosphere* 14, e4380.

ELKIN, C.; GIUGGIOLA, A.; RIGLING, A. ; BUGMANN, H; 2015. Short- and long-term efficacy of forest thinning to mitigate drought impacts in mountain forests in the European alps. *Ecol Appl* 25, 1083–1098.

GIMENO, T.E.; CAMARERO, J.J.; GRANDA, E.; PÍAS, B.; VALLADARES, F.; 2012. Enhanced growth of *Juniperus thurifera* under a warmer climate is explained by a positive carbon gain under cold and drought. *Tree Physio* 32: 326-336

GRANDA, E.; CAMARERO, J.J.; GIMENO, T.E.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; VALLADARES, F.; 2013. Intensity and Timing of Warming and Drought Differentially Affect Growth Patterns of Co-Occurring Mediterranean Tree Species. *Eur J For Res* 132: 469–80.

GOLDSMITH, G.R.; ALLEN, S. T.; BRAUN, S.; SIEGWOLF, R. T. W.; KIRCHNER, J. R.;



2022. Climatic Influences on Summer Use of Winter Precipitation by Trees. *Geophys Res Let*, 49, e2022GL098323

FERNÁNDEZ DE UÑA, L.; CAÑELLAS, I.; GEA-IZQUIERDO, G.; 2015. Stand competition determines how different tree species will cope with a warming climate. *PLoS One* 10, p. e0122255.

FYLLAS, N. M.; CHRISTOPOULOU, A.; GALANIDIS, A.; MICHELAKI, C. Z.; DIMITRAKOPOULOS, P.G.; FULÉ, P. Z.; ARIANOUTSOU, M.; 2017. Tree growth-climate relationships in a forest-plot network on Mediterranean mountains. *Sci Total Environ* 598, 393-403.

HARTIG, F.; 2022. DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed). Regression Models. R package version 0.4.6

HARVEY, J.I.; SMILJANIĆ, M.; SCHARNWEBER, T.; BURAS, A.; CEDRO, A.; CRUZ-GARCÍA, R.; DROBYSHEV, I.; JANECKA, K.; JANSONS, A.; KACZKA, R.; KLISZ, M.; LÄÄNELAID, A.; MATISONS, R.; MUFFLER, SOHAR, L.K.; SPYT, B.; STOLZ, J.; VAN DER MAATEN, E.; VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M.; VITAS, A.; WEIGEL, R.; KREYLING, J.; WILMKING, M.; 2019. Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. *Glob Change Biol*, 26: 2505–2518

HEILMAN, K.A.; DIETZE, M.C.; ARIZPE, A.A.; ARAGON, J.; GRAY, A.; SHAW, J.D.; FINLEY, A.O.; KLESSE, S.; DEROSE, R.J.; EVANS, M.E.K.; 2022. Ecological forecasting of tree growth: Regional fusion of tree-ring and forest inventory data to quantify drivers and characterize uncertainty. *Glob Chan Biol* 28, 2442-2460.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; BIAVATI, G.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; ROZUM, I.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; DEE, D.; THÉPAUT, J-N.; 2023. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) *Climate Data Store* (CDS), DOI: 10.24381/cds.f17050d7.

HEVIA, A.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; MAJADA, J.; 2016. Comparison of pruning effects on tree growth, productivity and dominance of two major timber conifer species. *For Ecol Manag* 374, 82-92.

HUANG, R.; ZHU, H.; LIANG, E.; BRÄUNING, A.; ZHONG, L.; XU, C.; FENG, X.; ASAD, F.; SIGDEL, S. R.; LI, L.; GRIEßINGER, J.; 2022. Contribution of winter precipitation to tree growth persists until the late growing season in the Karakoram of northern Pakistan. *J Hydro* 607, 127513.

JEONG, S-J.; HO, C-H.; GIM, H-J.; BROWN, M.E.; 2011. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Glob Chan Biol* 17, 2385-2399.

JONES, M. W.; ABATZOGLOU, J. T.; VERAVERBEKE, S.; ANDELA, N.; LASSLOP, G.; FORKEL, M., *et al.*; 2022. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Rev of Geophysics* 60, e2020RG000726

KEENAN, R.J.; 2015. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Ann For Sci* 72, 145–167

LEBOURGEOIS, L.; 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Ann For Sci* 57: 155-164.

LLORET, F.; KEELING, E.; SALA, A.; 2011. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120, 1909-



1920.

MADRIGAL-GONZÁLEZ, J.; HANTSON, S.; YUE, C.; POULTER, B.; CIAIS, P.; ZAVALA, M.A.; 2015. Long-term Wood Production in Water-Limited Forests: Evaluating Potential CO₂ Fertilization Along with Historical Confounding Factors. *Ecosystems* 18, 1043-155.

MÄKINEN, H.; ISOMÄKI, A.; 2004. Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *For Eco Manag* 201, 311-325

MALHI, Y.; FRANKLIN, J.; SEDDON, N.; SOLAN, M.; TURNER, M.G.; FIELD, C. B.; KNOWLTON, N.; 2020. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Phil Trans R Soc* 375, 20190104.

MARQUÉS, L.; MADRIGAL-GONZÁLEZ, J.; ZAVALA, M.A.; CAMARERO, J.J.; HARTIG, F.; 2018. Last-century forest productivity in a managed dry-edge scots pine population: the two sides of climate warming. *Ecol Appl* 28: 95–105

MARTÍN-BENITO, D.; KINT, V.; DEL RÍO, M., MUYS, B.; CAÑELLAS, I.; 2011. Growth responses of West-Mediterranean *Pinus nigra* to climate change are modulated by competition and productivity: past trends and future perspectives

For Ecol Manag 262, 1030-1040.

MAUSOLF, K.; WILM, P.; HÄRDTLE, W.; JANSEN, K.; SCHULDT, B.; STURM, K.; VAN OHEIMB, G.; HERTEL, D.; LEUSCHNER C.; FICHTNER A.; 2018. Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. *Sci Total Environ* 642, 1201–1208.

MARTÍNEZ-VILALTA, B.C.; LÓPEZ, B.C.; ADELL, N.; BADIELLA, L.; NINYEROLA, M.; 2008. Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions. *Glob Chan Biol* 14, 2868-2881.

MAZZA, G.; CUTINI, A.; MANETTI, M. C.; 2014. Site-specific growth responses to climate drivers of *Pinus pinea* L. tree rings in Italian coastal stands. *Ann For Sci* 71, 927-936.

MOREAU, G.; CHAGNON, C.; ACHIM, A.; CASPERSEN, J.; D'ORANGEVILLE, L.; SÁNCHEZ-PINILLOS, M.; THIFFAULT, N.; 2022. Opportunities and limitations of thinning to increase resistance and resilience of trees and forests to global change. *Forestry* 95, 595-615.

MORENO-FERNÁNDEZ, D.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, J.G.; HEVIA, A.; MAJADA, J.; CAÑELLAS, I.; GEA-IZQUIERDO, G.; 2014. Response to the interaction of thinning and pruning of pine species in Mediterranean mountains. *Eur J Forest Res* 133, 833-843.

MORENO-FERNÁNDEZ, D.; ALDEA, J.; GEA-IZQUIERDO, G.; CAÑELLAS, I.; MARTÍN-BENITO, D.; 2020. Influence of climate and thinning on *Quercus pyrenaica* Willd. coppices growth dynamics. *Eur J For Res* 140, 187-197.

MORENO-FERNÁNDEZ, D.; CAMARERO, J.J.; GARCÍA, M.; LINES, E.R.; SÁNCHEZ-DÁVILA, J.; TIJERÍN, J.; VALERIANO, C.; VIANA-SOTO, A.; ZAVALA, M.A.; RUIZ-BENITO, P.; 2022. The Interplay of the Tree and Stand-Level Processes Mediate Drought-Induced Forest Dieback: Evidence from Complementary Remote Sensing and Tree-Ring Approaches. *Ecosystems* 25, 1738-1753.

MORENO-FERNÁNDEZ, D.; RUBIO-CUADRADO, Á.; OLIVEIRA, N.; HERNÁNDEZ MATEO, L.; ALBERDI, Í.; ADAME, P.; CAÑELLAS, I.; 2024. Divergent spatio-temporal tree growth trends in *Pinus pinaster* Ait. in South-Western European forests. *Sci*



Total Envi 935, 173465.

NATALINI, F.; CORREIRA, A. C.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; ALEJANO, R.; 2015. Tree rings reflect growth adjustments and enhanced synchrony among sites in Iberian stone pine (*Pinus pinea* L.) under climate change. *Ann For Sci* 72, 1023-1033.

NATALINI, F.; ALEJANO, R.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; PARDOS, M.; CALAMA, R.; BUETGEN, U.; 2016. Spatiotemporal variability of stone pine (*Pinus pinea* L.) growth response to climate across the Iberian Peninsula. *Dendrochronologia* 40, 72-84.

PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G.; 2021. Tree species mixing can increase stand productivity, density and growth efficiency and attenuate the trade-off between density and growth throughout the whole rotation. *Ann Botany* 128, 767-786.

PRETZSCH, H.; DEL RÍO, M.; GROTE, R.; KLEMMT, H-J.; ORDÓÑEZ, C.; BRAVO, F.; 2022. Tracing drought effects from the tree to the stand growth in temperate and Mediterranean forests: insights and consequences for forest ecology and management. *Euro J For Res* 141, 727-751.

R CORE TEAM; 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

RODRIGUEZ DE PRADO, D.; RIOFRÍO, J.; ALDEA, J.; BRAVO, F.; HERRERO DE AZA, C.; 2022. Competition and climate influence in the basal area increment models for Mediterranean mixed forests. *For Ecol Manag* 506, 119955

SÁNCHEZ-SALGUERO, R.; CAMARERO, J.J.; HEVIA, A.; MADRIGAL-GONZÁLEZ, J.; LINARES, J.C.; BALLESTEROS-CANOVAS, J.C.; SÁNCHEZ-MIRANDA, Á.; ALFARO-SÁNCHEZ, R.; SANGÜESA-BARREDA, G.; GALVÁN, J.D.; GUTIÉRREZ, E.; GÉNOVA, M.; RIGLING, A.; 2015. What drives growth of Scots pine in continental Mediterranean climates: Drought, low temperatures or both? *Agr For Meteor* 206, 151-162.

SERRADA, R.; 2002. Apuntes de selvicultura. *EUIT Forestal. UPM*.

SOHN, J.A.; SAHA, S.; BAUHUS, J.; 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *For Eco Manag*, 380, 261-273.

SOLOMON, S.; PLATTNER, G.K.; KNUTTI, R.; FRIEDLINGSTEIN, P.; 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc Natl Acad Sci* 106, 1704-1709.

TROUVÉ, R.; BONTEMPS, J.-D.; COLLET, C.; SEYNAVE, I.; LEBOURGEOIS, F.; 2017. Radial growth resilience of sessile oak after drought is affected by site water status, stand density, and social status. *Trees* 31, 517-529.

TOUCHAN, R.; Anchukaitis, K.; MEKO, D.M.; Kerchouche, D.; SLIMANI, S.; ILMEN, R.; HASNAOUI, F.; GUIBAL, F.; CAMARERO, J.J.; SÁNCHEZ-SALGERO, R.; PIERMATTEI, A.; SESBOU, A.; COOK, B.I.; SABIR, M.; TOUCHANE, H.; 2017. Climate controls on tree growth in the Western Mediterranean. *The Holocene* 27, 1429-1442.

VERGARECHEA, M.; CALAMA, R.; FORTIN, M.; DEL RÍO, M.; 2019. Climate-mediated regeneration occurrence in Mediterranean pine forests: A modeling approach. *For Ecol Manag* 446, 10-19.

VERGARECHEA, M.; CALAMA, R.; PRETZSCH, H.; ALDAY, J.; DEL RÍO, M.; 2021. Short- and long-term growth response to climate in mixed and monospecific forests of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster*. *Euro J For Res* 140, 387-402.

VIEIRA, J.; ROSSI, S.; CAMPELO, F.; FREITAS, H.; NABAIS, C.; 2014. Xylogenesis of *Pinus pinaster* under a Mediterranean climate. *Ann For Sci* 71, 71-80

