



**2025** | **16-20**  
**GIJÓN** | **JUNIO**

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1641**

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

Organiza





## Las claras modifican las relaciones de las repoblaciones con la temperatura y la sequía.

MANRIQUE-ALBA, À. (1), BEGUERÍA, S. (2), CAMARERO, J.J. (3), DEL CAMPO, A.D. (4), NAVARRO-CERRILLO, R.M. (5); MOLINA, A.J. (5), CACHINERO-VIVAR, A.M (6), CASTILLO, V.M. (7), BARBERÁ, G.G. (7), HERNÁNDEZ, A. (8), JIMÉNEZ, M. N. (9), LUCAS-BORJA, M. E. (10), MORENO, G. (11), BLANCO, J.A. (12), IMBERT, J.B. (12), SÁNCHEZ-MIRANDA, Á. (13), NAVARRO, F. B (14), RIPOLL, M.A (14).

- (1) Centro de investigaciones sobre desertificación (CIDE, CSIC-UV-GVA). Climate, Atmosphere and Ocean Laboratory (Climatoc-Lab), Moncada, Valencia.
- (2) Estación Experimental Aula Dei (EEAD-CSIC), Zaragoza.
- (3) Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Zaragoza.
- (4) Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, E-46022 Valencia.
- (5) Research Group RNM-360, Departamento de Ingeniería Forestal, Evaluación y Restauración de Sistemas Agrícolas y Forestales (ERSAF), Universidad de Córdoba, 14014 Córdoba.
- (6) Laboratory of Dasometry and Forest Management, Forestry Engineering Department, School of Agriculture and Forestry, University of Córdoba, 14071 Córdoba.
- (7) Department of Soil and Water Conservation, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura CEBAS-CSIC, P.O. Box 164, E-30100 Espinardo.
- (8) Departamento de Medio Ambiente y Turismo, Gobierno de Aragón, E-50071 Zaragoza.
- (9) Departamento de Botánica, Universidad de Granada, 18071, Granada.
- (10) Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal y Genética, Campus Universitario s/n, C.P., Universidad de Castilla La Mancha, E-02071 Albacete.
- (11) Forest Research Group, INDEHESA, University of Extremadura, E-10600 Plasencia.
- (12) Campus de Arrosadía, Institute for Multidisciplinary Research and Applied Biology, Universidad Pública de Navarra, E-31006 Pamplona.
- (13) Dpto de Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Biología, Universidad de Sevilla. C/Profesor García González s/n, 41012 Sevilla.
- (14) Área de Recursos Naturales y Forestales, Centro IFAPA Camino de Purchil, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), Camino de Purchil s/n, E-18004 Granada.

### Resumen

Entre las consecuencias del cambio climático se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de variabilidad climática como los periodos cálidos o secos, lo que afectará negativamente sobre la productividad, el crecimiento y la resiliencia de los bosques. Por esta razón, hay un gran interés en comprender su vulnerabilidad a la sequía. Para ello, se ha estudiado el crecimiento y la sensibilidad a anomalías climáticas como sequías y temperaturas en las principales especies de pinos de la Península Ibérica (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*), junto con el efecto de la gestión (claras de diferentes intensidades). Los resultados muestran como la mayor disponibilidad de



agua derivada de las claras mejora el crecimiento radial para todas las especies, especialmente para *P. halepensis* y *P. pinaster*, siendo las menos sensibles a la sequía tras aclareos fuertes. Las claras también modificaron la relación entre temperatura y crecimiento, debilitando el efecto positivo de las temperaturas primaverales (STIspr) sobre el crecimiento para todas las especies excepto *P. sylvestris*, mientras que exacerbó el efecto negativo de las altas temperaturas estivales (STIsum) para todas las especies excepto *P. halepensis*. Además, el efecto positivo de las anomalías de temperatura otoñales (STIaut) sobre el crecimiento disminuyó en *P. halepensis* y *P. pinaster*. El efecto positivo de las claras es efectivo hasta 8-20 años después del tratamiento. En conclusión, las claras mitigaron la vulnerabilidad frente a la sequía, al tiempo que amplificó el impacto de las anomalías de temperatura de forma diferencial sobre las diferentes especies.

### Palabras clave

Silvicultura adaptativa, resiliencia, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*.

#### 1. Introducción

Las claras son una práctica silvícola que consiste en eliminar selectivamente una fracción de árboles de una masa forestal para reducir la competencia intraespecífica por recursos como la luz, el agua y los nutrientes. Al priorizar la conservación de los individuos más sanos y vigorosos, las claras mejoran su crecimiento y resiliencia (Sohn et al., 2016; Moreau et al., 2022). Desde el punto de vista ecológico, las claras promueven la heterogeneidad de la masa y mejoran la penetración de la luz en el suelo, lo que puede aumentar la biodiversidad del sotobosque (Li et al., 2020), y reduce el riesgo de plagas y enfermedades (Prospero y Cleary, 2017). También influye en la dinámica forestal al alterar las condiciones microclimáticas y mejorar la estabilidad estructural general de la masa y la función del ecosistema (Moreau et al., 2022). Además, numerosas investigaciones han señalado que las claras aumentan la resistencia a la sequía y la resiliencia al mejorar el acceso al agua de los árboles (Manrique Alba et al., 2020, 2022; Navarro-Cerrillo et al., 2023).

Sin embargo, los efectos de las claras sobre otros factores climáticos que influyen en el crecimiento de los árboles, como el estrés térmico provocado por el frío o el calor extremos, permanecen en gran medida inexplorados. Entender cómo influyen las claras en la respuesta de los árboles al estrés térmico es fundamental para gestionar los bosques en condiciones climáticas cambiantes, particularmente en regiones propensas a temperaturas extremas. Son pocas las investigaciones que consideran explícitamente la influencia de las anomalías de temperatura sobre el crecimiento en zonas propensas a la sequía (Astigarraga et al., 2020). Y un reducido número de estudios (Lucas-Borja et al., 2021; Navarro-Cerrillo et al., 2023) han considerado el efecto de las claras junto con la temperatura sobre el crecimiento de algunas especies de pino (p.e., *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris* y *P. halepensis*), pero utilizando datos de temperatura media mensual. Como novedad, proponemos el uso de un Índice Estandarizado de Temperatura (STI), basado en las anomalías de temperatura relativas a las condiciones normales para un sitio determinado, y con estas variables estudiar los efectos de las claras sobre el crecimiento.



Es decir, carecemos de una visión integrada de cómo interactúan las variables de gestión y las variables climáticas para diferentes especies arbóreas y a través de condiciones climáticas diferentes. Para evaluar estos efectos, utilizamos la dendrocronología, caracterizando gracias a ella cómo el crecimiento radial de los árboles responde a las anomalías de sequía y temperatura. Se han recopilado una gran cantidad de datos de 1464 series de anillos de 19 sitios experimentales situados en el este de la península ibérica. Se incluyen cuatro especies de pino (*P. halepensis*, *P. sylvestris*, *P. nigra* y *P. pinaster*) y dos intensidades diferentes de clara (moderado y fuerte). Los sitios experimentales considerados en este estudio cubren amplios rangos de precipitación y temperatura que abarcan gran parte del rango bioclimático de cada especie.

Por lo tanto, en este estudio, investigamos cómo dos intensidades de clara influyen en las respuestas individuales del crecimiento arbóreo a las anomalías climáticas estacionales, definidas por condiciones térmicas e hídricas estandarizadas.

## 2. Objetivos

Evaluar los efectos de la gestión forestal (en concreto claras de dos intensidades) sobre el crecimiento arbóreo en condiciones estacionales variables de temperatura y humedad, y así proporcionar información sobre la capacidad de adaptación de estas especies (*P. halepensis*, *P. nigra*, *P. sylvestris* y *P. pinaster*) a la variabilidad climática.

3. **Metodología 3. 1 Sitio de estudio** Las parcelas muestreadas corresponden a las parcelas experimentales de la red silvAdapt.net, una red de investigación para el monitoreo a largo plazo de la silvicultura con el objetivo de mejorar la adaptación de los bosques al cambio climático en repoblaciones (Molina et al., 2021). Compilamos datos de ancho de anillos de crecimiento de 19 sitios experimentales, que incluyen cuatro especies de pinos ampliamente representadas en la cuenca mediterránea: *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Aiton, *Pinus nigra* Arn. y *Pinus sylvestris* L. (Figura 1). Los sitios están ubicados a lo largo de un amplio rango geográfico y altitudinal (42° 48' - 37° 02' N, 3° 34' - 0° 51' O; 140-2025 m.s.n.m) y cubren una parte significativa del rango de distribución de las especies. Los sitios experimentales se extienden desde condiciones méxicas en el norte hasta condiciones xéricas en el sureste. La temperatura media anual varía de 8 a 18.2 °C, y la precipitación media anual oscila entre 287 y 1632 mm, con un balance hídrico medio anual (precipitación menos evapotranspiración potencial) que varía de -990 a +744 mm.

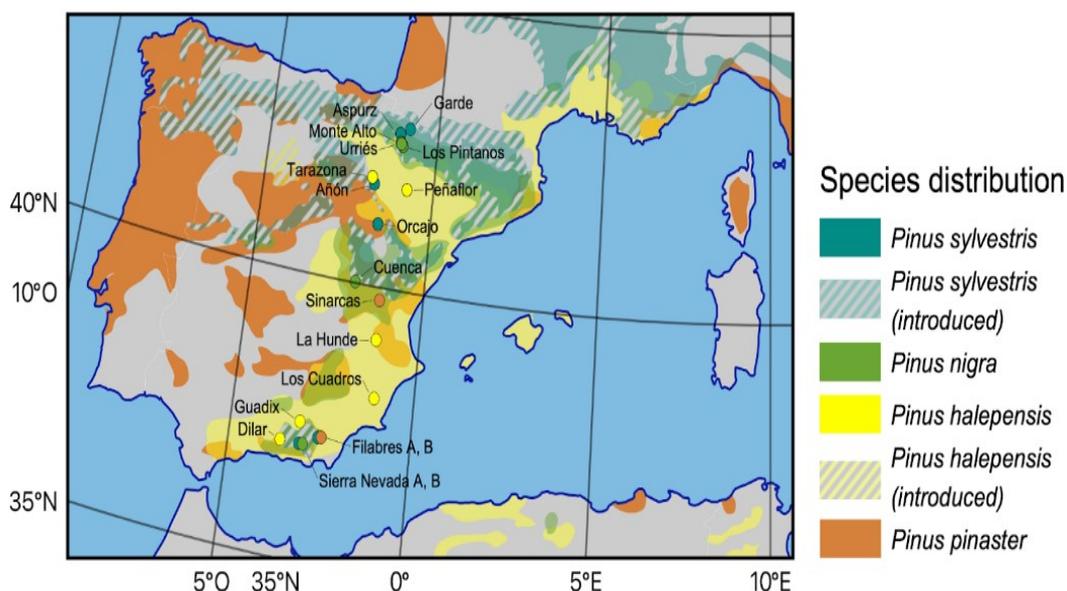


Figura 1. Distribución regional de las cuatro especies de pinos estudiadas (según Caudullo et al., 2019) y ubicación de los sitios de estudio.

Todos los sitios, excepto uno, corresponden a repoblaciones de pinares, la mayoría de las cuales forman parte de programas de reforestación llevados a cabo en España durante las décadas de 1950 y 1960. Todos estos sitios están gestionados, y cada sitio proporciona datos de una sola especie. Los tratamientos experimentales de clara se clasificaron según el porcentaje de área basal eliminada en dos intensidades: moderada (20-40% del área basal eliminada) y fuerte (>40% del área basal eliminada). En diez de los diecinueve sitios se implementan ambas intensidades de clara, lo que permitió una comparación entre las dos intensidades (tratado vs. parcelas control o sin aclarar) en dos o tres rodales por sitio. El tiempo transcurrido desde el aclareo varió entre 4 y 23 años (Tabla 1).

Tabla 1. Características silvícolas según la intensidad de la clara (% de área basal eliminada). Variables y abreviaturas: D, densidad de pies (pies ha<sup>-1</sup>); diámetro a la altura del pecho (Dbh, cm); y área basal (G, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>). Los valores son medias. La última columna muestra el número de árboles y cores muestreados.

	Sitio	D	Dbh	G	Intensidad clara	D después clara	Dbh después clara	G después clara	Nº árboles(cores)
<i>P. halepensis</i>	Tarazona	2000	13.6	31.0	T60/T40	1050/975	14.5/14.6	21.3/15.5	45 (90)
	Peñafior	973	15	16.3	T30	622	14	13.2	24 (48)
	La Hundede	1489	16.9	40	T40/T70/T90	744/478/178	17.7/17.5	27.2/18.2	45 (90)
	Los Cuadros	1400	14.1	24.6	T20/T35	770/550	14.1/14.9	12.8/10.0	45 (78)
	Guadix	1444	7.9	7.79	T48/T60/T75	681/513/325	9.1/10.1/10.1	4.7/4.12/2.6	128 (256)
	Dilar	628	24.04	28.5	T30/T50	439/314	25.18/26.80	21.86/17.7	45 (90)
<i>P.</i>	Sinarcas	580	22.6	22.2	T30	180	30	12.8	18 (36)

<i>Pinaster</i>	Filabres B	1600	19.6	48.3	T30/T60	1120/640	23.3/27.4	47.8/37.7	23 (45)
<i>P. nigra</i>	Monte Alto	1800	15.3	34.5	T40	580	21	20.5	20 (40)
	Urriés	1900	15.9	42	T50	450	26.5	23.1	20 (40)
	Los Pintanos	2741	76515.3	54.8	T40	980	20.5	34.5	20 (40)
	Cuenca	532	16.7	40.3	T30	379	17.7	34.1	(41) 82
	Nevada B	1240	16.50	26.5	T50/T70	620/372	18.63/18.75	16.90/10.2	45 (90)
<i>P. sylvestris</i>	Aspurz	3517	12.7	42.3	T30	2200	13.1	29.0	72 (144)
	Garde	3555	13.3	49.0	T30	1478	16.7	32.7	72 (144)
	Filabres A	910	17.9	20.4	T30/T60	637/364	18.3/18.6	16.8/9.9	45 (90)
	Nevada A	1160	21.97	43.9	T50/T70	580/348	21.3/18.17	20.66/9.09	45 (90)
	Orcajo	1150	25.6	59.5	T50	600	31.8	45.4	30 (60)
	Añon	1250	27	83	T50	550	30.7	39	30.60

### 3.2 Dendrocronología

En cada sitio, se seleccionaron entre 10 y 30 árboles por tratamiento, lo que hace un total de 1464 muestras de 732 árboles (dos testigos extraídos por árbol). Las muestras se recogieron de árboles dominantes y maduros en buen estado de salud, sin daños visibles. Todos los testigos se extrajeron a 1.3 m de altura utilizando barrenas de Pressler. También se recopiló información silvícola relevante para cada sitio experimental a nivel de rodal, tanto antes como después de que se llevaran a cabo los tratamientos (Tabla 1).

### 3.3 Datos climáticos

Para evaluar los efectos del clima anual en el crecimiento, analizamos las anomalías de temperatura y sequía utilizando índices climáticos estandarizados: el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) y los Índices de Temperatura Estandarizados para primavera (STIspr), verano (STIsum) y otoño (STIaut). El SPEI se utilizó para caracterizar las condiciones hídricas durante la temporada de crecimiento (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014). Este índice, que estandariza el balance hídrico climático (es decir, la diferencia entre la precipitación acumulada y la evapotranspiración de referencia), permite realizar comparaciones a lo largo del tiempo y el espacio. Los valores positivos de SPEI indican condiciones más húmedas de lo normal, mientras que los valores negativos indican condiciones más secas de lo normal o sequías.

Para caracterizar los factores térmicos que influyen en el crecimiento, utilizamos un Índice de Temperatura Estandarizado (STI), que cuantifica las anomalías de temperatura en relación con las condiciones normales específicas de cada sitio. Los valores positivos de STI indican condiciones más cálidas de lo normal, mientras que los valores negativos indican condiciones más frías de lo normal. Similar al SPEI, utilizamos análisis de correlación para determinar los índices STI más relevantes para cada sitio. Sin embargo, se espera que los efectos



del estrés térmico varíen a lo largo de la temporada de crecimiento. Específicamente, se plantea la hipótesis de que las condiciones más cálidas favorecerían el incremento basal anual (BAI) al inicio y al final de la temporada de crecimiento, cuando el crecimiento está limitado por la energía, pero impactarían negativamente el BAI durante el verano, cuando el exceso de calor limita el crecimiento. Para tener en cuenta estas dinámicas estacionales, calculamos tres índices distintos para representar las condiciones térmicas durante la primavera ( $STI_{spr}$ ), el verano ( $STI_{sum}$ ) y el otoño ( $STI_{aut}$ ).

### 3.4 Modelización estadística

El estudio utilizó un modelo jerárquico bayesiano para analizar la relación entre el incremento basal anual (BAI) y varias covariables. El modelo asume una distribución Gamma para el BAI, con una función de enlace logarítmica. Los efectos fijos incluyeron la especie, el tratamiento y las variables climáticas (SPEI,  $STI_{spr}$ ,  $STI_{sum}$  y  $STI_{aut}$ ), junto con sus interacciones. Se incluyó un decaimiento exponencial para el efecto del tratamiento con el tiempo, además de efectos aleatorios para individuos y sitios, y un componente de paseo aleatorio para capturar la autocorrelación temporal en los datos de crecimiento. La estructura del modelo incorporó tanto efectos fijos como aleatorios, con interceptos aleatorios para los árboles individuales y los testigos, y componentes de paseo aleatorio para capturar la autocorrelación del BAI a lo largo de los años.

Después de ajustar el modelo utilizando R-INLA, se analizaron las distribuciones posteriores de los coeficientes del modelo para interpretar los efectos de la especie, el tratamiento y el clima, así como sus interacciones y efectos aleatorios. Se utilizaron simulaciones predictivas posteriores para explorar las interacciones entre especie, tratamiento y clima, lo que permitió generar trayectorias de crecimiento específicas por especie bajo varios escenarios. Estas simulaciones tuvieron en cuenta tanto los efectos fijos como aleatorios, proporcionando información sobre las variaciones de BAI según los tratamientos y las condiciones climáticas, al mismo tiempo que abordaban la incertidumbre y la variabilidad.

## 4. Resultados

### 4.1 Crecimiento

La Figura 2 presenta las series medias de BAI para cada sitio de estudio, destacando las diferencias entre las parcelas de control y las parcelas tratadas en las cuatro especies después de los tratamientos. Las parcelas aclaradas mostraron de forma consistente un mayor crecimiento en comparación con las parcelas de control, con diferencias observadas entre las intensidades de tratamiento moderado y fuerte.

En el caso de la clara moderada, *P. sylvestris* y *P. nigra* mostraron un aumento en el crecimiento de aproximadamente 50-53%, mientras que *P. halepensis* y *P. pinaster* presentaron aumentos más grandes, que variaron entre 107-132%. Bajo la clara de intensidad fuerte, *P. sylvestris* y *P. nigra* mostraron aumentos de crecimiento alrededor del 71-75%, mientras que *P. halepensis* y *P. pinaster* mostraron incrementos aún mayores, estimados entre 160-200%.

El crecimiento de los árboles también respondió a las condiciones climáticas, con una reducción del crecimiento en los años secos y un crecimiento mejorado durante los años húmedos.

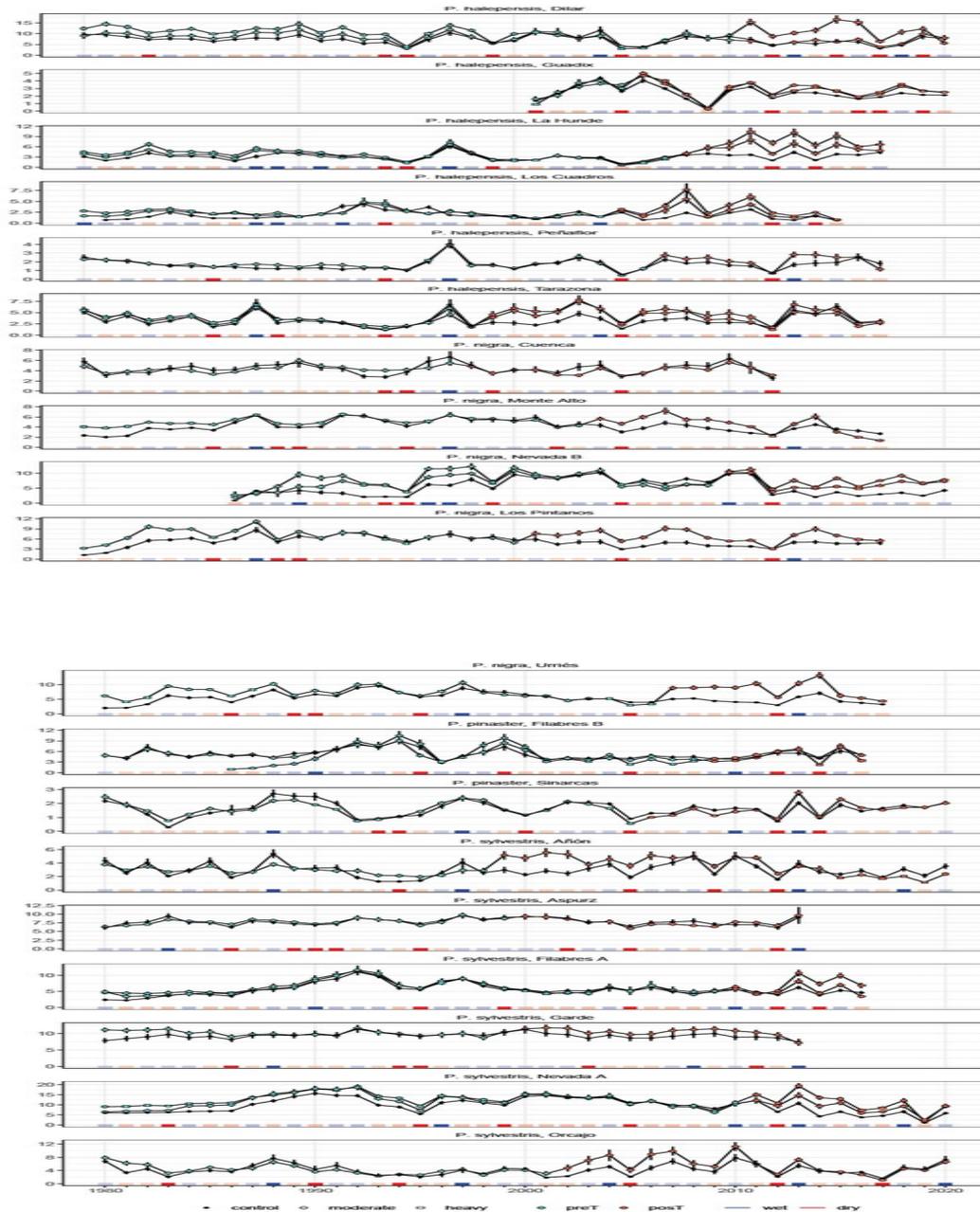


Figura 2. Se presentan los valores medios y los errores estándar del incremento de área basal anual (BAI) para las repoblaciones de *P. halepensis*, *P. nigra*, *P. pinaster* y *P. sylvestris* en los diecinueve sitios de estudio, tanto para las parcelas control (puntos negros) como para las parcelas aclaradas sometidas a diferentes intensidades de tratamiento: moderada (círculos) y fuerte (cuadrados). Los diferentes colores en las parcelas aclaradas diferencian entre los períodos antes del aclareo (preT, azul) y después del aclareo (postT, rojo). Los rectángulos verticales en la parte inferior de los gráficos representan un gradiente de años secos a húmedos, con rojo indicando años secos y azul indicando años húmedos.



### 4.2 Modelo de crecimiento

La Figura 3 muestra la distribución de los coeficientes del modelo para los efectos fijos, señalando diferencias importantes entre las especies. El coeficiente de crecimiento fue positivo y significativamente diferente de cero para todas las especies, con dos grupos distintos: *P. halepensis* y *P. pinaster* mostraron un crecimiento similar, y *P. nigra* y *P. sylvestris* exhibieron un mayor crecimiento, siendo *P. sylvestris* la que mostró el mayor crecimiento. Las especies de sitios más húmedos (*P. sylvestris* y *P. nigra*) tuvieron un mayor crecimiento que las de sitios más secos (*P. halepensis* y *P. pinaster*).

Las claras tuvieron un efecto positivo en el crecimiento de todas las especies, siendo más acentuado para las claras de intensidad fuerte en comparación con el tratamiento de intensidad moderada. El mayor efecto se observó en *P. halepensis* para ambas intensidades de clara.

En cuanto a las variables climáticas, el coeficiente del SPEI fue significativamente positivo para todas las especies, excepto *P. sylvestris*, lo que indica que el crecimiento depende en gran medida de la disponibilidad hídrica. Los índices térmicos mostraron que las temperaturas primaverales más cálidas (STIspr) aumentaron el crecimiento en *P. halepensis* y *P. pinaster*, mientras que las temperaturas de verano (STIsun) afectaron negativamente el crecimiento en *P. halepensis*. El coeficiente del STIaut fue significativo para todas las especies, excepto *P. pinaster*, siendo *P. halepensis* la especie con el mayor efecto, seguida de *P. sylvestris* y *P. nigra*.

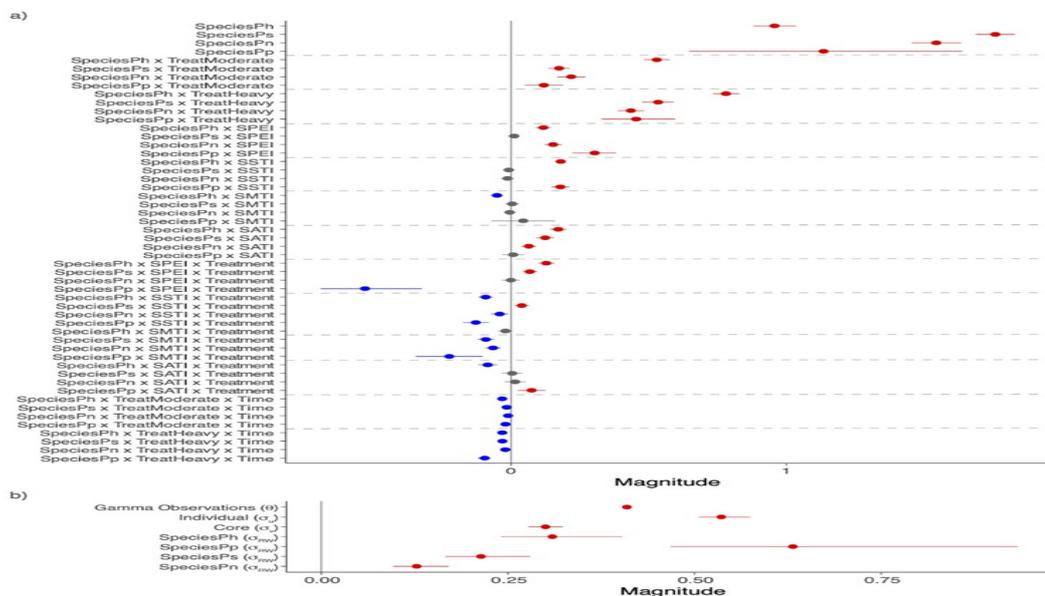


Figura 3. Coeficientes del modelo e intervalos de credibilidad del 95% de los parámetros del modelo (efectos fijos, en escala logarítmica); Los puntos rojos son creíbles y positivos, los puntos azules son creíbles y negativos, y los puntos grises no son creíbles (el intervalo de credibilidad contiene cero). Abreviaturas de las especies: Ph, *P. halepensis*; Ps, *P. sylvestris*; Pn, *P. nigra*; y Pp, *P. pinaster*.



La gestión forestal mediante claras en interacción con el SPEI y los índices térmicos afectó el crecimiento de las especies. Las claras tuvieron un efecto significativo sobre el efecto del agua (SPEI), elevado y consistente en *P. halepensis* y *P. sylvestris*, pero no significativo en *P. nigra* y con una gran incertidumbre para *P. pinaster*. Las claras tuvieron un efecto significativo sobre el índice térmico primaveral (STIspr) en todas las especies, siendo más fuerte en *P. halepensis* y *P. pinaster*. En *P. nigra* y *P. sylvestris*, las claras mitigaron el impacto de STIspr. Las claras también exacerbaron el efecto negativo de las altas temperaturas de verano (STIsum) en todas las especies, excepto en *P. halepensis*. Finalmente, los tratamientos afectaron significativamente al índice térmico de otoño (STIaut) para *P. halepensis* y *P. pinaster*, pero no en *P. sylvestris* ni en *P. nigra*.

Además, se observaron variaciones dentro de las especies, con efectos más y menos fuertes a la disponibilidad de agua y el estrés térmico sobre el crecimiento. *P. halepensis* mostró una mejor respuesta de crecimiento al SPEI y una disminución de la respuesta a los índices STIspr y STIaut. Por otro lado, *P. nigra* mostró un efecto no significativo del tratamiento sobre el SPEI y un efecto más débil de los índices STIspr y STIsum. *P. pinaster* mostró un fuerte efecto del SPEI y STIaut, y un efecto más débil de los índices STIspr y STIsum. Finalmente, *P. sylvestris* también mostró una fuerte respuesta de crecimiento al SPEI y STIspr, mientras que el efecto de STIsum sobre el crecimiento fue débil (Figura 3).

## 5. Discusión

Las claras aumentan significativamente el incremento de área basal (BAI) en las cuatro especies estudiadas (*P. halepensis*, *P. nigra*, *P. sylvestris* y *P. pinaster*) (Sohn et al., 2016; Moreau et al., 2022). Este hecho ha quedado demostrado en numerosas publicaciones para todas las especies estudiadas: Para *P. halepensis* (del Campo et al., 2014; Manrique-Alba et al., 2020, 2022; Veullen et al., 2023), *P. nigra* (Esteban et al., 2012; Lucas-Borja et al., 2021), *P. sylvestris* (Navarro-Cerrillo et al., 2019) y *P. pinaster* (Cachinero-Vivar et al., 2021; Ferriz et al., 2023). Podemos distinguir dos grupos de especies según su presencia dominante en las zonas xerófilas y de menor altitud (especies tolerantes a la sequía, *P. halepensis* y *P. pinaster*) o en sitios mesoclimáticos húmedos y frescos a mayor altitud (las especies sensibles a la sequía, *P. nigra* y *P. sylvestris*). Las especies de sitios xerófilos mostraron un mayor incremento de crecimiento tras las claras, mientras que las de sitios méxicos presentaron respuestas más moderadas (Gazol et al., 2022).

Las diferentes respuestas de las especies de pinos a las condiciones de sequía han sido ampliamente estudiadas (Camarero et al., 2015), revelando diferencias significativas en el crecimiento y la sensibilidad a variables climáticas. En este sentido las claras son una estrategia efectiva para reducir la competencia entre árboles y mitigar los efectos de la sequía en bosques climáticamente estresados (Sohn et al., 2016; Moreau et al., 2022; Navarro-Cerrillo et al., 2023). Sin embargo, la selvicultura adaptativa no sólo reduce la competencia, sino que también puede aumentar el efecto del estrés hídrico en el crecimiento de especies como *P. halepensis* y *P. sylvestris*. Esto sugiere una respuesta más elástica del crecimiento a las condiciones climáticas, permitiendo que las especies aprovechen mejor las



condiciones húmedas favorables (Manrique-Alba et al., 2020; 2022; Navarro-Cerrillo et al., 2023).

Respecto a la temperatura, el crecimiento respondió positivamente a las anomalías térmicas de primavera ( $STI_{spr}$ ) y otoño ( $STI_{aut}$ ), pero negativamente a las de verano ( $STI_{sum}$ ). El efecto de las claras modificó estas respuestas: redujo el impacto positivo de  $STI_{spr}$  y  $STI_{aut}$  en especies xerófilas y amplificó el impacto negativo de  $STI_{sum}$  en especies méxicas (Navarro-Cerrillo et al., 2023; Lucas-Borja et al., 2021). Estos hallazgos destacan el efecto de los tratamientos sobre las condiciones microclimáticas, al abrir el dosel se aumenta la exposición a la radiación, el viento y las temperaturas cercanas al suelo (Anderegg et al., 2013; Russell et al., 2018). Esto sugiere que los efectos de las claras sobre el crecimiento dependen tanto de las características ecológicas de las especies como de las condiciones específicas del sitio.

## 6. Conclusiones

Actualmente existe un interés creciente por comprender cómo la gestión forestal, concretamente las claras, influyen en el crecimiento y la resiliencia frente a la variabilidad climática. Es especialmente importante evaluar los beneficios de las claras sobre el crecimiento, así como su interacción con los principales factores climáticos, como las anomalías hídricas y térmicas. En este estudio, se evidencia que las claras mejoran el crecimiento de los árboles en todas las especies estudiadas, con variaciones según la especie y características climáticas. La mayor disponibilidad de agua mejora el crecimiento en *P. halepensis* y *P. sylvestris*, sugiriendo una respuesta más elástica en estas especies. Por otro lado, las anomalías térmicas tienen efectos diversos: los índices térmicos de primavera y otoño tienen impactos positivos, mientras que el índice de verano tiene efectos negativos. Después de los tratamientos, el efecto del índice de primavera se debilita en especies de sitios cálidos y secos, como *P. halepensis* y *P. pinaster*, pero se intensifica en especies de sitios húmedos y frescos, como *P. sylvestris*. Mientras que el índice de verano aumenta su impacto negativo en sitios meso climáticos.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y la Comisión Europea NextGenerationEU (Reglamento UE 2020/2094), a través de la Plataforma Temática Interdisciplinar Clima y Servicios Climáticos (PTI-Clima) del CSIC y el proyecto de la red Silvadapt.net (proyectos RED2018-102719-T y RED2022-134910-T, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033).

## 8. Bibliografía

- ANDEREGG, W. R., KANE, J. M., & ANDEREGG, L. D. 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature climate change*, 3(1), 30-36.
- ASTIGARRAGA, J., ANDIVIA, E., ZAVALA, M. A., GAZOL, A., CRUZ-ALONSO, V., VICENTE-SERRANO, S. M., ET AL. 2020. Evidence of non-stationary relationships



- between climate and forest responses: increased sensitivity to climate change in Iberian forests. *Glob Change Biol.* 26, 5063–5076.
- BEGUERÍA, S., VICENTE-SERRANO, S.M., REIG, F., LATORRE, B., 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.* 34, 3001–3023.
- CACHINERO-VIVAR, A.M., PALACIOS-RODRÍGUEZ, G., LARA-GÓMEZ, M.A., NAVARRO-CERRILLO, R. M., 2021. Thinning Effect of C Sequestration along an Elevation Gradient of Mediterranean *Pinus* spp. Plantations. *Forests* 12 (11), 1583.
- CAMARERO, J. J., GAZOL, A., TARDIF, J. C., & CONCIATORI, F. 2015. Attributing forest responses to global-change drivers: limited evidence of a CO<sup>2</sup>-fertilization effect in Iberian pine growth. *Journal of Biogeography*, 42(11), 2220-2233.
- CAUDULLO, G., BARREDO, J.I., 2019. A georeferenced dataset of drought and heat-induced tree mortality in Europe. *One Ecosyst.* 4, e37753.
- 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. *Forest Ecology and Management*, 519, 120324.
- ESTEBAN, L.G., MARTÍN, J.A., DE PALACIOS, P., FERNÁNDEZ, F.G., 2012. Influence of region of provenance and climate factors on wood anatomical traits of *Pinus nigra* arn. subsp. *salzmannii*. *Eur. J. For. Res.* 131, 633–645.
- FERRIZ, M., MARTIN-BENITO, D., CAÑELLAS, I., GEA-IZQUIERDO, G., 2021. Sensitivity to water stress drives differential decline and mortality dynamics of three co-occurring conifers with different drought tolerance. *For. Ecol. Manag.* 486, 118964.
- GAZOL, A., OLIVA, J., VALERIANO, C., COLANGELO, M., & CAMARERO, J. J. 2022. Mixed pine forests in a hotter and drier world: the great resilience to drought of Aleppo pine benefits it over other coexisting pine species. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 899425.
- LUCAS-BORJA, M.E., ANDIVIA, E., CANDEL-PÉREZ, D., LINARES, J.C., CAMARERO, J.J., 2021. Long term forest management drives drought resilience in Mediterranean black pine forest. *Trees* 35, 1651–1662.
- MANRIQUE-ALBA, À., BEGUERÍA, S., & CAMARERO, J. J. 2022. Long-term effects of forest management on post-drought growth resilience: An analytical framework. *Science of The Total Environment*, 810, 152374.
- MANRIQUE-ALBA, À., BEGUERÍA, S., MOLINA, A.J., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., TOMAS-BURGUERA, M., DEL CAMPO, A.D., CAMARERO, J.J., 2020. Long-term thinning effects on tree growth, drought response and water use efficiency at two Aleppo pine plantations in Spain. *Sci. Total Environ.* 728, 138536.
- MOLINA AJ, NAVARRO-CERRILLO RM, PÉREZ-ROMERO J, ALEJANO R, BELLOT JF, BLANCO JA, CAMARERO JJ, CARRARA A, CASTILLO VM, CERVERA T, BARBERÁ GG, GONZÁLEZ-SANCHIS M, HERNÁNDEZ Á, IMBERT JB, JIMÉNEZ MN, LLORENS P, LUCAS-BORJA ME, MORENO G, HERAS MM-DL, NAVARRO FB, PALACIOS G, PALERO N, RIPOLL MA, REGÜES D, RUIZ-GÓMEZ FJ, VILAGROSA A, DEL CAMPO AD. *SilvAdapt.Net: A Site-Based Network of Adaptive Forest Management Related to Climate Change in Spain.* 2021.*Forests.* 12(12):1807.
- 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(5), 595-615.
- NAVARRO-CERRILLO, R. M., CACHINERO-VIVAR, A. M., PÉREZ-PRIEGO, Ó.,



- CANTÓN, R. A., BEGUERIA, S., & CAMARERO, J. J. 2023. Developing alternatives to adaptive silviculture: Thinning and tree growth resistance to drought in a Pinus species on an elevated gradient in Southern Spain. *Forest Ecology and Management*, 537, 120936.
- PROSPERO, S. AND CLEARY, M. 2017 Effects of host variability on the spread of invasive forest diseases. *Forests* 8, 80.
- RUSSELL, E. S., LIU, H., THISTLE, H., STROM, B., GREER, M., & LAMB, B. 2018. Effects of thinning a forest stand on sub-canopy turbulence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 295-305.
- SOHN, J.A.; SAHA, S.; BAUHUS, J. 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *For. Ecol. Manag.* 380, 261–273.
- VEUILLEN, L., PRÉVOSTO, B., ALFARO-SÁNCHEZ, R., BADEAU, V., BATTIPAGLIA, G., BEGUERÍA, S., ... & CAILLERET, M. 2023. Pre-and post-drought conditions drive resilience of *Pinus halepensis* across its distribution range. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339, 109577.
- VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23, 1696–1718.