

RESPUESTA AL CLIMA Y A LAS PRINCIPALES TELECONEXIONES DE *PINUS HALEPENSIS* EN UNA REGIÓN MEDITERRÁNEA SEMIÁRIDA (SIERRA DE SAN QUÍLEZ, BINÉFAR)

RESPOSTA AL CLIMA I A LES PRINCIPALS TELECONNEXIONS DE *PINUS HALEPENSIS* EN UNA REGIÓ MEDITERRÀNIA SEMIÀRIDA (SERRA DE SAN QUÍLEZ, BINÈFAR)

RESPONSE TO CLIMATE AND THE MAIN TELECONNECTIONS OF *PINUS HALEPENSIS* IN A SEMI-ARID MEDITERRANEAN REGION (SIERRA DE SAN QUÍLEZ, BINÉFAR)

LORIÉN TORNOS ESTUPIÑÁ

RESUMEN

En una situació accelerada de calentament global com a conseqüència del canvi climàtic, és de vital importància comprendre com estan respondint nostres boscos. En este treball se pretenden identificar i analitzar les variables climàtiques que afecten al pino carrasco (*Pinus halepensis*) en la sierra de San Quílez (Binéfar), lo que podria revelar com esta especie mediterrànea se està veient afectada y discutir possibles escenaris futurs.

Palabras clave: Cambio climático, dendrocronología, *Pinus halepensis*, Binéfar

Fotografía: Marina García Moreno-Cid

LITTERA

Núm. 8, año 2024, pág. 177 - 192

RESUM

En una situació accelerada d'escalfament global com a conseqüència del canvi climàtic, és de vital importància comprendre com responen els nostres boscos. En aquest treball es pretén identificar i analitzar quines variables climàtiques afecten el pi blanc (*Pinus halepensis*) a la Serra de San Quílez (Binèfar), cosa que podria revelar com aquesta espècie mediterrània es veu afectada i discutir possibles escenaris futurs.

Paraules clau: Canvi climàtic, dendrocronologia, *Pinus halepensis*, Binèfar

ABSTRACT

In an accelerated situation of global warming due to climate change, it is vitally important to understand how our forests are responding. In this work, it is intended to identify and analyze which climatic variables affect the Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in the Sierra de San Quílez (Binèfar), which could reveal how this Mediterranean species is being affected and discuss possible future scenarios.

Keywords: Climate change, dendrochronology, *Pinus halepensis*, Binèfar

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca mediterránea es el área mediterránea por excelencia. Abarca el mar Mediterráneo y las zonas circundantes, entre las que se incluyen territorios del sur de Europa, norte de África y oeste de Asia. Situada en un área transicional entre el clima árido del norte de África y el clima húmedo y templado del centro de Europa, la región mediterránea es susceptible a las interacciones que se producen entre procesos atmosféricos de latitudes medias y tropicales (Bastos et al., 2016; Giorgi & Lionello, 2008).

El clima mediterráneo se caracteriza por presentar veranos secos y cálidos e inviernos frescos y húmedos, cuando se suceden la mayor parte de las precipitaciones. La existencia de una estacionalidad tan marcada, de hecho, está considerada como uno de los factores más influyentes en los ecosistemas de áreas mediterráneas, al que numerosas especies se han adaptado. Por ejemplo, muchas de las especies vegetales típicamente mediterráneas presentan hojas pequeñas y resistentes o raíces profundas para poder sobrevivir a los periodos de sequía. Entre ellas se encuentra el pino carrasco, *Pinus halepensis* (De Luis et al., 2007; Mauri et al., 2016), la especie que conforma el pinar de la sierra de San Quílez.

Además, haciendo hincapié en el apartado climático, no nos deberíamos centrar únicamente con los valores locales de precipitación, temperatura, etcétera, sino que se deberían tener también en cuenta patrones climáticos a mayor escala, como las teleconexiones (Hallett et al., 2004). Estas tienden a tener cierta periodicidad, alternando fases positivas y negativas que influyen directamente sobre el clima local y pueden ser buenos predictores climáticos a mayor distancia temporal (Bastos et al., 2016). Entre las principales teleconexiones que podrían afectar a nuestro territorio están la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación del Oeste Mediterráneo (WeMO) y el patrón del Atlántico Este (EA). Por ello, en este trabajo, para analizar la respuesta al clima del *Pinus halepensis*, se utilizarán tanto datos climáticos locales como datos de las principales teleconexiones que tienen influencia sobre la península ibérica (Camisón et al., 2016; Hernández Alonso, 2021; Martin Vide & López Bustins, 2006; Sánchez López, 2016).

A nivel de biodiversidad, esta región se considera un «punto caliente». Su situación geográfica singular, una amplia gama de condiciones climáticas y una topografía heterogénea han propiciado la aparición de numerosos endemismos (especies exclusivas de esta zona). Sin embargo, el cambio climático está afectando negativamente a la península ibérica, siendo esta una de las regiones más vulnerables al mismo (European Commission. Directorate-General for the Environment & Sundseth, 2010; Giorgi & Lionello, 2008; IPCC, 2022).

Entre los efectos directos del cambio climático destacan el aumento de las temperaturas, cambios en los regímenes de precipitaciones y el aumento del nivel del mar; afectando todos ellos a los ecosistemas y recursos hídricos de la región. Los cambios en los usos del suelo antropogénicos (como la deforestación, agricultura, ganadería intensiva, urbanización, etcétera) están provocando la pérdida y fragmentación de hábitats (Masson-Delmotte et al., 2019). Asimismo, las especies invasoras o alóctonas introducidas amenazan la biodiversidad y los ecosistemas autóctonos (Calvin et al., 2023; European Commission. Directorate-General for the Environment & Sundseth, 2010).

Todo ello está provocando pérdidas de biodiversidad, mayor escasez de agua, un aumento en el número de los incendios forestales y efectos negativos directos sobre la salud humana (Calvin et al., 2023; IPCC, 2022).

2. MATERIALES Y MÉTODOS:

2.1 La sierra de San Quílez y el pino carrasco (*Pinus halepensis*)

La sierra de San Quílez (41°50'24.88"N, 0°15'44.53"E) se encuentra situada en la comarca de la Litera, bajo la influencia de las llanuras centrales de la depresión del Ebro. Presenta unas condiciones climáticas severas donde la vegetación se ve condicionada por distintos factores limitantes:

- . Escasa precipitación anual (354 mm en promedio desde 1962)
- . Temperaturas que oscilan entre valores extremos, alcanzando valores bajo cero en invierno y valores cercanos a los 40°C en verano
- . Alto índice de evapotranspiración, lo que se traduce en una gran pérdida de agua por efecto de la evaporación
- . Suelos de carácter salino

Dados estos condicionantes, la variedad de vegetación forestal de porte arbóreo es escasa, encontrándose únicamente el pino carrasco (*Pinus halepensis*) y la carrasca (*Quercus rotundifolia*). Acompañando a esta masa forestal, en la sierra también nos encontramos con vegetación de carácter arbustivo y herbáceo adaptada a la aridez característica de la zona.

El pino carrasco es una conífera mediterránea altamente tolerante a la sequía, de ahí que en su área de distribución se encuentren territorios áridos y semiáridos. En la cuenca mediterránea es la especie con mayor área de distribución de entre los pinos mediterráneos. De hecho, algunos modelos bioclimáticos predicen que el área de distribución será mayor en el futuro, desplazándose a expensas de otras especies con menor tolerancia a la sequía (Benito Garzón et al., 2008).

La plantación de pino carrasco (*Pinus halepensis*) que nos encontramos en la sierra de San Quílez procede de diferentes reforestaciones que se han ido sucediendo durante el tiempo. Por ello, para poder abarcar la variabilidad existente, se estudiaron parcelas repartidas a lo largo de la sierra.

Gran parte de esta información se ha extraído del capítulo 2 («Paisaje y Biodiversidad») de la Agenda 21 Local (desarrollada en Binéfar) cuyo proceso de elaboración finalizó en 2005.

2.2 Metodología

La metodología del trabajo contempla dos partes. La primera de ellas engloba el trabajo de campo; la segunda incluye el trabajo en laboratorio y el análisis de datos.

2.2.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo se desarrolló entre diciembre de 2022 y enero de 2023. Se muestrearon al azar parcelas circulares en las que se tomaron datos de campo y se extrajo un testigo por árbol, favoreciendo así el muestreo de un número mayor de ejemplares.

2.2.2 Trabajo de laboratorio: procesamiento de las muestras

En el laboratorio se procesaron las muestras siguiendo el método establecido por Stokes y Smiley en 1968. Dicho proceso se podría resumir en cuatro fases:

1ª Fase: secado de muestras

Las muestras, después de haber sido recogidas en el campo y almacenadas en pajitas (mejor de papel que de plástico), se dejan secando en el laboratorio para que pierdan humedad y evitar pudriciones.

2ª Fase: Preparación de los listones

Son el medio donde emplazaremos las muestras obtenidas en campo, de ahí la importancia de su correcta preparación. En nuestro caso se realizó un surco por listón, que es lo que mejor se adapta a nuestras necesidades, ya que trabajamos con una única muestra por árbol. A su vez, para saber con qué muestra se está trabajando se debe anotar información útil en el listón que permita identificarlo y obtener datos rápidamente. En nuestro caso, la información incluida contiene el código de identificación (único por muestra y árbol), el diámetro del árbol (DAP), el nombre de la parcela y la fecha de extracción (imagen 2).



Fig. 1: Fresadora haciendo surco en un listón que posteriormente se usará en análisis dendrocronológico (Foto: Marina García Moreno-Cid)



Fig. 2: Anotación de información clave en el listón. Podemos ver el código del testigo «PH12» que hace referencia a la especie (PH ->Pinus halepensis) y al número de árbol (12), el diámetro (DAP) medido en centímetros, la parcela a la que pertenece el testigo (BIN1 -> Binéfar-1) y la fecha de extracción del testigo (23/12/2022) (Foto: Marina García Moreno-Cid)

3ª Fase: Montaje

Los testigos se colocan de manera que las fibras estén perpendiculares al listón. La visualización de las fibras se hace desde uno de los extremos del testigo. Colocándolos así, nos aseguraremos de que, tras lijarlos, podamos identificar y medir correctamente los anillos de crecimiento. Para fijar el testigo al listón, utilizamos cola blanca de secado rápido y pinzas de papelería.



Fig. 3: Revisión de la posición de las fibras antes de montar el testigo en el listón (Foto: Marina García Moreno-Cid)



Fig. 4: Fijado de una muestra (Foto: Marina García Moreno-Cid)

4ª Fase: Lijado

La fase de lijado comienza una vez se ha secado la cola empleada en el paso anterior. Empezamos utilizando una lijadora eléctrica de grano grueso (para rebajar el nivel del testigo) y seguimos lijando a mano, cambiando cada vez a un grano más fino. Este es un proceso gradual (debemos evitar pasar de una lija de grano grueso a una de grano muy fino) en el que se debe tener cuidado para trabajar luego con muestras de mayor calidad.



Fig. 5: Lijado a mano de una muestra (Foto: Marina García Moreno-Cid)



Fig. 6: Testigos tras la fase de procesamiento (Foto: Marina García Moreno-Cid)

2.2.3 Trabajo de laboratorio: estudio de las muestras y obtención de datos de interés

Tras pasar por las fases anteriores tendremos la muestra lista para escanear. Estas muestras son tratadas con escáneres de alta resolución y se procesan con distintos programas de análisis dendrocronológico. Estos programas nos permiten marcar los anillos, medir la distancia entre ellos y, finalmente, obtener datos útiles que nos servirán para estudiar las muestras.

Los datos climáticos locales (precipitación y temperatura) empleados en el estudio se obtuvieron de la estación climática del AEMET de Lleida-Observatorio (9771; 1960-1982) y de Lleida (9771C; 1983-2022). La calidad de estos datos climáticos para trabajar

en Binéfar era buena puesto que la estación climática de Lleida se sitúa apenas a 40 kilómetros de distancia de la sierra de San Quílez y a una altura similar. A su vez, se comprobó con datos interpolados de las series E-OBS y CRU TS4.04 que los datos de la estación de Lleida (AEMET) eran representativos de Binéfar.



Fig. 7: Muestra dendrocronológica analizada en Coorecorder 7.6 (Cybis) (Foto: Marina García Moreno-Cid)

Con respecto a las principales teleconexiones, los datos de la EA (patrón del Atlántico Este) se obtuvieron de www.esrl.noaa.gov/, los datos de la NAO (Oscilación del Atlántico Norte) de www.cru.uea.ac.uk/ y los datos de la WeMO (Oscilación del Oeste Mediterráneo) de www.ub.edu/gc/es/. Para estas se calcularon los índices para el periodo invierno-primavera (de noviembre del año anterior a mayo del año estudiado), puesto que es cuando mayor influencia tienen (Hernández-Alonso et al., 2021).

Los datos se procesaron con software de uso libre, R 4.3.1 (R Core Team, 2023) para observar la influencia del clima sobre el crecimiento arbóreo. Primeramente, se estandarizaron las variables potencialmente explicativas, los índices de teleconexiones y el tamaño de árbol. Se generaron dos conjuntos de modelos para cada periodo temporal estudiado, analizando por separado las variables climáticas y teleconexiones. Para llegar al mejor modelo se siguió el Criterio de Información de Akaike corregido para el tamaño de muestra (Anderson & Burnham, 2002), partiendo del modelo más complejo (que incluye todas las variables) y simplificándolo hasta llegar al mejor modelo posible.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

3.1 El clima durante los últimos 60 años en Binéfar ¿hacia dónde vamos?

Los datos de precipitación y temperatura media anual de los últimos 62 años, 356.3 ± 99.3 mm y $17.2 \pm 0.8^\circ\text{C}$ respectivamente, muestran una gran variabilidad, especialmente para la precipitación anual (gráfico 1a).

Con respecto a la tendencia, podemos ver en el gráfico que existe una ligera tendencia negativa en las precipitaciones y una tendencia positiva con respecto a las temperaturas. Este patrón es aún más claro cuando representamos los promedios por lustros o por décadas (gráficos S1 y S2). Con relación a estas tendencias, podemos observar a nivel estacional (gráficos S3 y S4) ciertas diferencias entre estaciones.

Todo esto concuerda con las proyecciones climáticas sobre la península ibérica, donde se espera un aumento generalizado de las temperaturas a la vez que una disminución en las precipitaciones y un cambio en el régimen de estas. A su vez, la sucesión de eventos extremos se prevé que aumente en frecuencia (Allen et al., 2010; Dai, 2013; Giorgi & Lionello, 2008; IPCC, 2022).

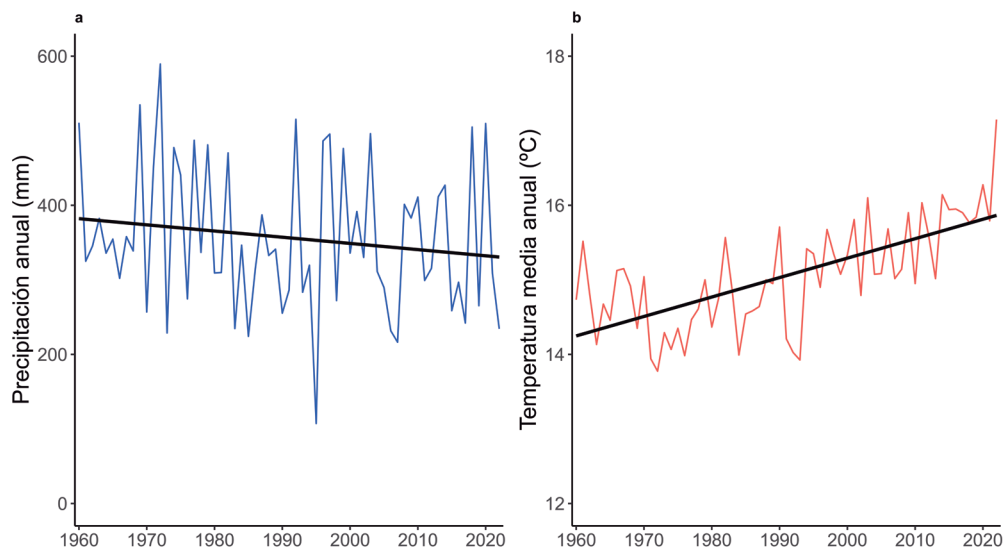


Gráfico 1: Precipitación (Graf. 1a) y temperatura media anual (Graf. 1b) desde 1960 a 2022 en Binéfar

3.2 Crecimiento arbóreo (incrementos en área basal)

Al estudiar el crecimiento arbóreo se toma la presunción de que los árboles crecen formando círculos perfectos. Teniendo en cuenta esta premisa, transformaremos los datos de distancia entre anillos que hemos obtenido previamente en incrementos de área basal (BAI).

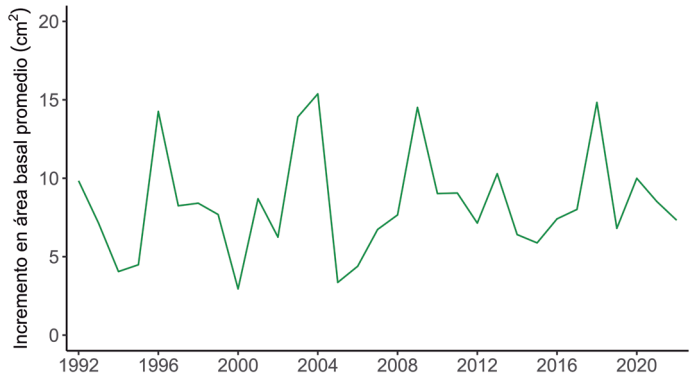


Gráfico 2: Crecimiento promedio interanual de los ejemplares muestreados de *Pinus halepensis* en la sierra de San Quílez (Binéfar, Huesca)

Estos incrementos de área basal aportan información valiosa sobre el crecimiento anual de los árboles y su respuesta a factores ambientales (como la respuesta a la precipitación o temperatura), la disponibilidad de nutrientes, eventos de perturbación (como incendios) o incluso la respuesta a otros fenómenos (como el fenómeno de competencia entre árboles vecinos).

Todo esto es esencial para comprender la historia de crecimiento de los árboles y para construir una buena cronología. En el caso de este estudio llevado a cabo en Binéfar se construyó una cronología de 1992 a 2022.

A pesar de tener ejemplares mucho más longevos, se optó por recortar la cronología debido a interferencias en el crecimiento que deberían ser estudiadas más en detalle. En este caso, las interferencias se podrían deber a la procesionaria, al manejo (como tareas de

clareo) o incluso a la elevada competencia entre ejemplares presente en algunas parcelas, todo esto dificulta la captación de la posible respuesta climática de los ejemplares.

3.3 Relación clima local – crecimiento

En relación a la respuesta al clima y, especialmente, la respuesta a la precipitación y temperatura, se analizó el crecimiento arbóreo para tres clases temporales. La primera de ellas englobaba los últimos 30 años y los dos siguientes los últimos 25 y 20 años respectivamente.

Tabla 1: Resumen mejores modelos de las variables climáticas para cada uno de los espacios temporales estudiados

Periodo estudiado	Variables mejor modelo	R2c
1992 - 2022	Lluvia_InvPri	0,57
1997 - 2022	Lluvia_InvPri + TM_otoño	0,54
2002 - 2022	Lluvia_InvPri + TM_otoño	0,53

Los factores limitantes que aparecieron en los mejores modelos fueron la precipitación durante el periodo invierno-primavera (Lluvia_InvPri) y, para los últimos 20 y 25 años, la temperatura media de otoño (TM_otoño).

Los resultados muestran que ambas variables ejercen un papel positivo sobre el crecimiento de los árboles. Que la precipitación tenga un efecto positivo sobre el crecimiento es algo que no sorprende, puesto que es uno de los factores más limitantes en la región mediterránea (Bogino & Bravo, 2008; Gazol & Camarero, 2022). El hecho de que la temperatura media de otoño también lo tenga puede deberse a que años con temperaturas en otoño más suaves podrían alargar la etapa de crecimiento (Madrigal González, 2018).

Centrándonos en nuestras variables explicativas, en el siguiente gráfico se representan los dos extremos de la precipitación en el periodo invierno-primavera. Podemos ver los tres años más lluviosos representados en azul y los tres menos lluviosos en rojo. Podemos ver que esta variable tiene una influencia directa en el crecimiento, al coincidir generalmente años de gran crecimiento con años lluviosos y viceversa.

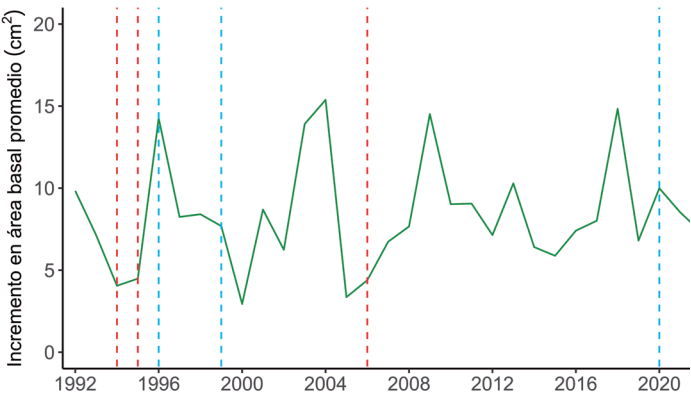


Gráfico 3: Crecimiento promedio interanual de los ejemplares muestreados de *Pinus halepensis* (verde) en la Sierra de San Quilez (Binéfar, Huesca) y años más (azul) y menos (rojos) lluviosos durante el periodo invierno-primavera.

Esto se ve más claro en los años más secos, que coinciden con años de crecimiento más limitado. Sin embargo, podemos observar también que los años en los que la lluvia ha marcado valores extraordinariamente positivos para el periodo invierno-primavera, por ejemplo, el año 2020 con 323,6 mm, no encontramos los picos de crecimiento más destacados (excepción año 1996). Esto se podría deber a las interferencias a la respuesta climática anteriormente mencionadas u otros factores.

Aun así, lo que llama la atención es que la temperatura media de primavera-verano no aparezca en nuestro mejor modelo. Esto es sorprendente ya que las altas temperaturas en este periodo tienden a suprimir el crecimiento arbóreo (Gea-Izquierdo et al., 2021), sobre todo en áreas donde la sequía es uno de los factores más limitantes, si no el que más (Peñuelas et al., 2017; Sarris et al., 2007).

3.4 Relación teleconexiones – crecimiento

El patrón de respuesta a las teleconexiones es algo más difuso que la respuesta a las variables climáticas locales (precipitación, temperatura), siendo la varianza explicada por estas menor. Las principales teleconexiones que aparecen en nuestros mejores modelos son la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación del Oeste Mediterráneo (WeMO) y el patrón del Atlántico Este (EA).

Sin embargo, solo para la ventana de 2002 a 2022 encontramos un modelo que explique más del 40 % de la varianza. Este modelo incluye la NAO y WeMO para el periodo de invierno-primavera y explica el 41 % de la varianza. El efecto que tienen estas variables sobre el crecimiento es opuesto, mientras que la NAO afecta negativamente al crecimiento, la WeMO tiene un efecto positivo sobre él.

Todo esto es congruente con la zona geográfica de estudio. En esta, las fases positivas de la NAO están relacionadas con inviernos secos y sus fases negativas están vinculadas a inviernos cálidos y húmedos. Con lo referente a la WeMO, está más relacionada con la variabilidad de las precipitaciones en zonas donde la NAO es menos influyente (Hernández Alonso, 2021; Martín Vide & López Bustins, 2006).

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En relación a las plantaciones de pino carrasco (*Pinus halepensis*) en la sierra de San Quílez se ha visto en este trabajo la sensibilidad de esta especie al clima, especialmente a la precipitación durante el periodo hidrológico invierno-primavera. La respuesta a las temperaturas otoñales fue también positiva, al poder alargar, seguramente, el periodo de crecimiento ese año. Con lo referente a las teleconexiones la respuesta no ha sido tan clara, respondiendo positivamente a la NAO y a la WeMO. Todo esto se podría deber a interferencias en el crecimiento anual anteriormente mencionadas, como la competencia, el manejo u otros.

Con vistas al futuro, la sierra de San Quílez es un emplazamiento con potencial para el desarrollo de diversos estudios forestales. Por ejemplo, al existir también plantaciones de carrasca (*Quercus rotundifolia*) en la zona, se podrían estudiar ambas especies en

conjunto. La coexistencia de quercíneas (especies del género *Quercus*) y coníferas (como *Pinus halepensis*) puede favorecer la resiliencia del ecosistema ante perturbaciones a través de mecanismos de compensación funcional (Tornos Estupiñá et al., 2023). Los estudios también podrían ir orientados al estudio de la competencia, puesto que algunas de estas plantaciones muestran un nivel de competencia elevado que afecta negativamente a su crecimiento. Estudios relacionados con la procesionaria o incluso la medición de la captura de carbono por parte de estas plantaciones serán también interesantes, por lo que el potencial para desarrollar estudios en esta zona como los mencionados o de otra índole aportarían información útil.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; McDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H. (Ted); GONZÁLEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J.H.; ALLARD, G.; RUNNING, S. W.; SEMERCI, A. & COBB, N. (2010). «A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests». *Forest Ecology and Management*, 259 (4), pp. 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- ANDERSON, D. R. & BURNHAM, K. P. (2002). «Avoiding Pitfalls When Using Information-Theoretic Methods». *The Journal of Wildlife Management*, 66 (3), pp. 912-918.
- BASTOS, A.; JANSSENS, I. A.; GOUVEIA, C. M.; TRIGO, R. M.; CIAIS, P.; CHEVALLIER, F.; PEÑUELAS, J.; RÖDENBECK, C.; PIAO, S.; FRIEDLINGSTEIN, P. & RUNNING, S. W. (2016). «European land CO₂ sink influenced by NAO and East-Atlantic Pattern coupling». *Nature Communications*, 7(1), p. 10315. <https://doi.org/10.1038/ncomms10315>
- BENITO, M.; SÁNCHEZ DE DIOS, R. & SAINZ, H. (2008). «Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species». *Applied Vegetation Science*, 11(2), pp. 169-178. <https://doi.org/10.3170/2008-7-18348>
- BOGINO, S. M. & BRAVO, F. (2008). «Growth response of *Pinus pinaster* Ait. To climatic variables in central Spanish forests». *Annals of Forest Science*, 65(5), pp. 506-506. <https://doi.org/10.1051/forest:2008025>
- CALVIN, K.; DASGUPTA, D.; KRINNER, G.; MUKHERJI, A.; THORNE, P. W.; TRISOS, C.; ROMERO, J.; ALDUNCE, P.; BARRETT, K.; BLANCO, G.; CHEUNG, W. W. L.; CONNORS, S.; DENTON, F.; DIONGUE-NIANG, A.; DODMAN, D.; GARSCHAGEN, M.; GEDEN, O.; HAYWARD, B.; JONES, C.; ... PÉAN, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. LEE and J. ROMERO (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- CAMISÓN, Á.; SILLA, F. & CAMARERO, J. J. (2016). «Influences of the atmospheric patterns on unstable climate-growth associations of western Mediterranean forests». *Dendrochronologia*, 40, pp. 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.09.004>

- DAI, A. (2013). «Increasing drought under global warming in observations and models». *Nature Climate Change*, 3(1), pp. 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- DE LUIS, M.; GRIČAR, J.; ČUFAR, K. & RAVENTÓS, J. (2007). «Seasonal Dynamics of Wood Formation in *Pinus Halepensis* from Dry and Semi-Arid Ecosystems in Spain». *IAWA Journal*, 28(4), pp. 389-404. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001651>
- EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE-GENERAL FOR THE ENVIRONMENT & SUNDSETH, K. (2010). *Natura 2000 en la región mediterránea*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/16497>
- GAZOL, A. & CAMARERO, J. J. (2022). «Compound climate events increase tree drought mortality across European forests». *Science of The Total Environment*, 816, p. 151604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151604>
- GEA, G., ARANDA, I., CAÑELLAS, I., DORADO, I., OLANO, J. M. & MARTIN, D. (2021). «Contrasting species decline but high sensitivity to increasing water stress on a mixed pine–oak ecotone». *Journal of Ecology*, 109(1), pp. 109-124. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13450>
- GIORGI, F. & LIONELLO, P. (2008). «Climate change projections for the Mediterranean region». *Global and Planetary Change*, 63(2-3), pp. 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- HALLETT, T. B.; COULSON, T.; PILKINGTON, J. G.; CLUTTON-BROCK, T. H.; PEMBERTON, J. M. & GRENFELL, B.T. (2004). «Why large-scale climate indices seem to predict ecological processes better than local weather». *Nature*, 430(6995), pp. 71-75. <https://doi.org/10.1038/nature02708>
- HERNÁNDEZ, H. (2021). «Differential growth responses in *Pinus nigra*, *P. pinaster* and *P. sylvestris* to the main patterns of climatic variability in the western Mediterranean». *Forest Ecology and Management*, 8.
- IPCC (2022). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (1ª ed.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- MADRIGAL, J. (2018). «Disentangling the relative role of climate change on tree growth in an extreme Mediterranean environment». *Science of the Total Environment*, 11.
- MARTIN, J. & LÓPEZ, J.A. (2006). «The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula». *International Journal of Climatology*, 26(11), pp. 1455-1475. <https://doi.org/10.1002/joc.1388>

- MASSON, V.; Intergovernmental Panel on Climate Change; WMO & United Nations Environment Programme (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems: summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- MAURI, A.; LEO, M. D.; DE RIGO, D. & CAUDULLO, G. (2016). *Pinus halepensis and Pinus brutia in Europe: Distribution, habitat, usage and threats*.
- PEÑUELAS, J.; SARDANS, J.; FILELLA, I.; ESTIARTE, M.; LLUSIÀ, J.; OGAYA, R.; CARNICER, J.; BARTRONS, M.; RIVAS, A.; GRAU, O.; Peguero, G.; Margalef, O.; PLA, S.; STEFANESCU, C.; ASENSIO, D.; PREECE, C.; LIU, L.; VERGER, A.; BARBETA, A.; ... TERRADAS, J. (2017). «Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services». *Forests*, 8(12), p. 463. <https://doi.org/10.3390/f8120463>
- R CORE TEAM (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- SÁNCHEZ, G. (2016). «Climate reconstruction for the last two millennia in central Iberia: The role of East Atlantic (EA), North Atlantic Oscillation (NAO) and their interplay over the Iberian Peninsula». *Quaternary Science Reviews*, 16.
- SARRIS, D.; CHRISTODOULAKIS, D. & KÖRNER, C. (2007). «Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean». *Global Change Biology*, 13(6), pp. 1187-1200. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01348.x>
- TORNOS, L.; HERNÁNDEZ, H.; MADRIGAL, J.; RODRIGUES, A. & SILLA, F. (2023). «Species-specific growth responses to local and regional climate variability indicate the presence of a diversity portfolio effect in mediterranean tree assemblages». *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, p. 109665. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109665>

Anexos

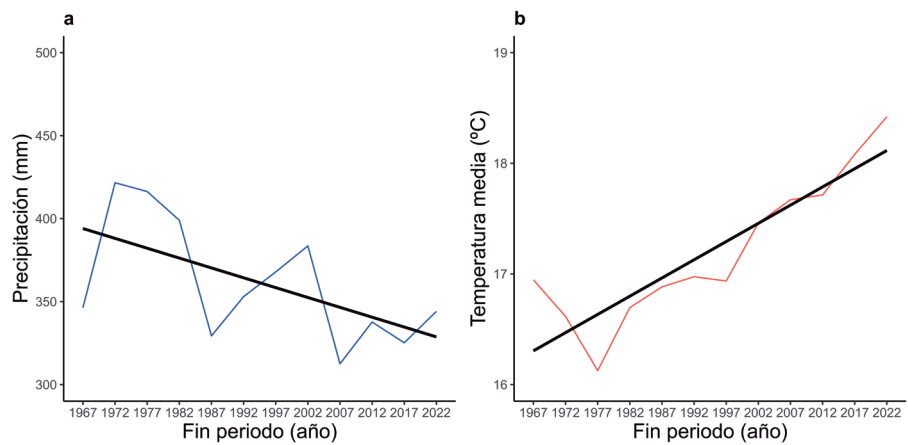


Gráfico S1: Precipitación (S1a) y temperatura media anual (S1b) desde 1962 a 2022 en Binéfar tomando los valores promedio cada 5 años. El valor que se indica engloba ese año y los cinco anteriores (ej. el valor que aparece para el año 1967 es el valor promedio del periodo 1962-1967)

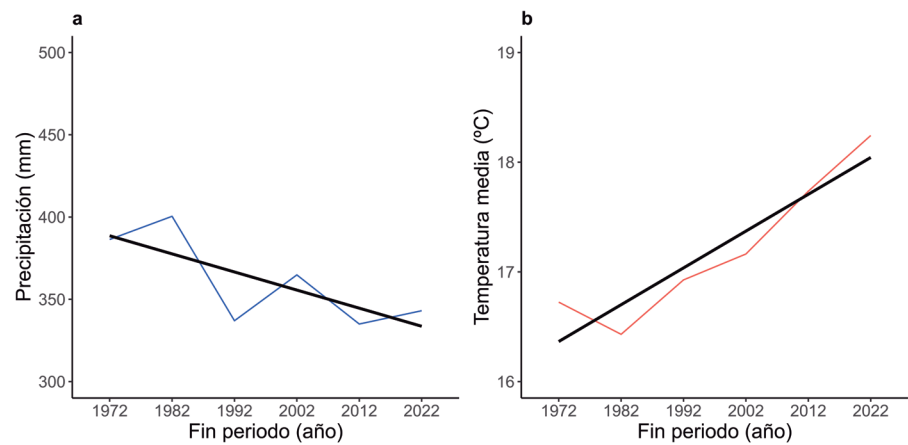


Gráfico S2: Precipitación (S2a) y temperatura media anual (S2b) desde 1962 a 2022 en Binéfar tomando los valores promedio cada 10 años. El valor que se indica engloba ese año y los diez anteriores (ej. el valor que aparece para el año 1972 es el valor promedio del periodo 1962-1972)

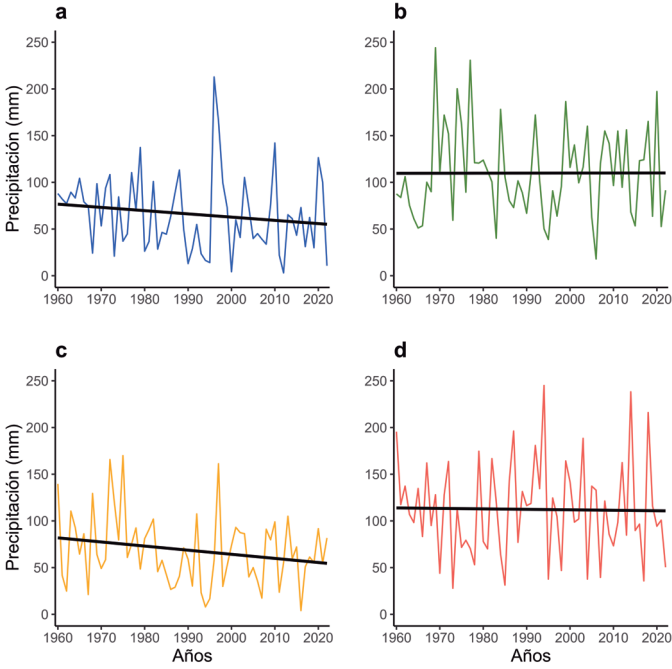


Gráfico S3: Datos de precipitación estacional por año. Precipitación en invierno (a, azul), primavera (b, verde), verano (c, amarillo) y otoño (d, naranja)

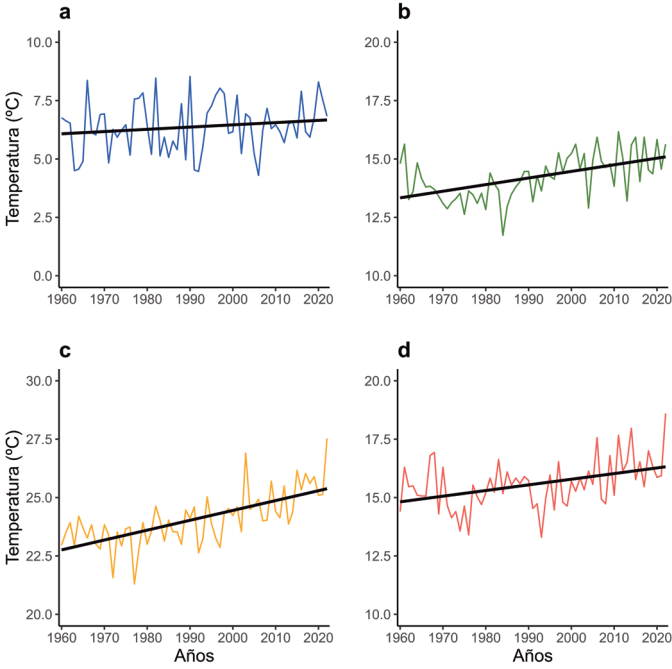


Gráfico S4: Datos de temperatura media estacional por año. Temperatura media en invierno (a, azul), primavera (b, verde), verano (c, amarillo) y otoño (d, naranja).