



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-029

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017  
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Plasticidad en la respuesta del crecimiento de *Pinus pinea* L. a la variabilidad espaciotemporal del clima en España: una aproximación dendrocronológica

NATALINI, F.<sup>1</sup>, ALEJANO MONGE<sup>1</sup>, M. R., BÜNTGEN, U.<sup>3</sup>, CALAMA, R.<sup>2</sup>, PARDOS MÍNGUEZ, M.<sup>2</sup> y VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Campus de La Rábida, 21819 Palos de la Frontera, Huelva

<sup>2</sup> CIFOR-INIA, Ctra. de la Coruña km 7.5, Madrid 28040, Spain

<sup>3</sup> Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf, Switzerland

### Resumen

El aumento de temperatura y sequía tiene impactos en la producción de los bosques mediterráneos. El pino piñonero tiene gran valor ecológico y socio-económico en España por lo que es importante entender su respuesta al clima para evaluar su futuro estado de conservación. En este trabajo se estudian las relaciones clima-crecimiento en pino piñonero en España con métodos dendroclimatológicos en un gradiente latitudinal (Meseta Norte, Sistema Central, bajo Guadalquivir). La respuesta del crecimiento a las precipitaciones en abril-junio fue más alta en el norte. Desde los años 50, la respuesta a las precipitaciones en abril-junio aumentó en el norte y disminuyó en el sur. La estación seca empieza en junio-julio en el norte, pero en mayo en el sur, por lo que el déficit hídrico es más limitante en el sur y puede explicar la señal dendroclimática más débil en primavera/verano. Estos resultados indican la plasticidad de la respuesta al clima del pino piñonero, que podrá resistir a futuros aumentos de temperatura y sequía. Sin embargo, su capacidad adaptativa varía en su área de distribución y los bosques meridionales podrían llegar a condiciones límites de persistencia. Los resultados sugieren posibles cambios en la fisiología y en las dinámicas de población de esta especie.

### Palabras clave

Dendroclimatología; Relaciones clima-crecimiento, Cambio climático

### 1. Introducción

Varios procesos relacionados con el cambio climático se han observado en los ecosistemas forestales de la Península Ibérica. Entre ellos, variaciones en la fenología de las especies, reducciones del crecimiento forestal y de los productos no maderables, procesos de decaimiento y mortandad de los árboles, aumento de alteraciones ecológicas como plagas e incendios (Lindner & Calama, 2013). Asimismo, las proyecciones de la distribución de las especies indican cambios en el futuro (Benito Garzón et al., 2008).

Los bosques de pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en España están gestionados como bosques multifuncionales y tienen una gran importancia socio-económica y medioambiental (Montero et al., 2008). Es necesario entender los efectos del cambio climático en la ecología de esta especie para evaluar su capacidad adaptativa y para desarrollar sistemas de gestión que aseguren la conservación de las funciones de estos ecosistemas.

Los anillos de crecimiento de *P. pinea* proporcionan información sobre las relaciones entre clima y crecimiento de esta especie. Natalini et al. (2015) encontraron variaciones temporales en las correlaciones entre crecimiento de anillos y clima en bosques de pino piñonero en Andalucía occidental y Castilla-La Mancha. Estas variaciones reflejaban una respuesta al aumento de temperaturas y sequía durante las décadas 1970, 80 y 90. Sin embargo, la señal dendroclimática almacenada en las series dendrocronológicas manifiesta también variabilidad espacial, dependiendo

de las condiciones climáticas específicas de distintas zonas dentro del área de distribución de la especie (De Luis et al., 2013; Mazza et al., 2014). En España, *P. pinea* crece en áreas con diversas condiciones ecológicas y climáticas (Montero et al., 2008), por tanto se puede esperar un grado de variabilidad espacial en la señal dendroclimática de esta especie. La variedad de condiciones a las que una especie está adaptada determina la capacidad de responder a futuros cambios climáticos, y esto debe tomarse en cuenta para la modelización de los efectos del cambio climático en los ecosistemas forestales.

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es avanzar en el conocimiento sobre las dinámicas relacionadas con el clima de los bosques de pino piñonero en España. Nuestra hipótesis es que la señal dendroclimática especie-específica varía en el espacio y en el tiempo en consecuencia de la variabilidad espaciotemporal del clima. Para testar esta hipótesis, se han estudiado las relaciones clima-crecimiento y sus variaciones en el tiempo con series dendrocronológicas de pino piñonero procedentes de zonas con distintas condiciones climáticas a lo largo de un gradiente latitudinal en España.

## 3. Metodología

Las muestras dendrocronológicas se recogieron en 5 rodales maduros: “Carrascal” (CAR), “Viana de Cega” (VIA), “Hoyo de Pinares” (HOY), Valverde del Camino (VAL), e “Hinojos” (HNJ) (Tabla 1). Las muestras se tomaron con barrena forestal de Pressler y se procesaron con las técnicas dendrocronológicas estándar (Speer, 2010). Los bosques en CAR y VIA son gestionados con fines de protección (tienen una importante función de fijación de dunas continentales) y también para la producción de madera y piñón. Los bosques en VAL y HNJ se gestionan principalmente para producción maderera y de biomasa, con objetivo secundario de producción de piñón. La silvicultura en CAR, VIA, VAL y HNJ está caracterizada por claras para mejorar el desarrollo del fuste y de las copas. En HOY, el bosque tiene una función de protección hidrogeológica, la gestión selvícola es reducida y la función de producción no es importante. Las condiciones climáticas son parecidas entre los dos sitios del norte (CAR y VIA) y los dos sitios del sur (VAL y HNJ), pero varían con la latitud. La precipitación anual y la temperatura media son 404 mm y 12° C en CAR, 357 mm y 12° C en VIA, 548 mm y 11° C en HOY, 525 mm y 17° C en VAL, 527 mm y 18° C en HNJ (valores calculados a partir de la cuadrícula de datos climáticos E-OBS del proyecto EU-FP6 ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com>).

Las anchuras de anillos se midieron en centésimas de mm con un estereomicroscopio y una mesa LINTAB™ conectada al software TSAP-Win™ (Rinntech®) para la visualización y el análisis de las cronologías. La sincronización de las series se verificó mediante las técnicas de “cross-dating” (Grissino-Mayer, 2001). Para estandarizar las cronologías, se efectuó el “detrending” de las series individuales con una curva ajustada spline con una longitud de onda 30 años, se calcularon los índices de crecimiento como ratios entre los valores observados (anchuras de anillos) y los estimados por la curva de detrending, y finalmente la cronología maestra de cada sitio de estudio se calculó como media robusta entre las series de índices. Se tomaron los datos de precipitación y temperaturas (medias, máximas y mínimas) de la cuadrilla E-OBS y se calcularon las correlaciones (con método de remuestreo bootstrapping para construir los intervalos de confianza; Guiot, 1990) entre las cronologías maestras y las series climáticas en cada sitio de estudio para el periodo 1950-2011 (común entre las series climáticas y las cronologías de anillos). Además, las correlaciones se calcularon en dos periodos sucesivos de igual extensión, 1950-1980 y 1981-2011. Se construyeron los climodiagramas de cada sitio para los dos periodos para observar la variabilidad espaciotemporal del clima. Los meses en los que la precipitación en mm es menor del doble de la temperatura media en ° C ( $P < 2T$ ), se identificaron como meses secos.

Tabla 1. Localización y características de los sitios de estudio

	CAR	VIA	HOY	VAL	HNJ
Localización geográfica (provincia)	Meseta Norte (Valladolid)	Meseta Norte (Valladolid)	Sistema Central (Ávila)	Transición Sierra Morena-Valle del Guadalquivir (Huelva)	Valle del Guadalquivir (Huelva)
Latitud [°N]	41,59	41,47	40,51	37,53	37,28
Longitud [°W]	4,33	4,72	4,38	6,78	6,39
Altitud [m s. n. m.]	880	710	890	260	80
Suelo (clasificación FAO)	Cambisoles	Arenosoles	Leptosoles	Luvisoles	Cambisoles/Regosoles
Pendiente (exposición)	0	0	50-60 (sur)	0	0
Composición del rodal	Mixto (P. pinea-Quercus ilex-Juniperus thurifera)	Puro (P. pinea)	Puro (P. pinea)	Puro (P. pinea)	Puro (P. pinea)
Altura media de los pies [m]	10	17	19	18	18
Diámetro medio de los pies [cm]	45	50	75	65	70

#### 4. Resultados

A lo largo del gradiente latitudinal estudiado se observaron distintas correlaciones clima-crecimiento. Los coeficientes de correlación significativos en los sitios del norte (CAR y VIA, Figura 1) mostraron distribuciones bimodales parecidas: hubo correlaciones positivas con la precipitación desde octubre/noviembre del año anterior al de formación del anillo hasta enero del año corriente, y de abril a junio del año corriente; las correlaciones con las temperaturas fueron positivas de diciembre a febrero y negativas de mayo a junio/julio. Correlaciones parecidas se observaron también en HOY (Figura 1). En los sitios del sur se encontró una diferente distribución en las correlaciones (VAL y HNJ, Figura 1): hubo correlaciones positivas con la precipitación desde noviembre hasta enero, pero la correlación con la precipitación en primavera no fue significativa; hubo correlación positiva con las temperaturas medias y mínimas en invierno, pero no con las máximas, y no hubo correlación con las temperaturas de verano.

Las correlaciones clima-crecimiento no fueron estables en el tiempo, y mostraron diferentes cambios temporales entre los sitios de estudio. En el norte, la distribución bimodal de los coeficientes de correlación significativos se hizo más evidente en el segundo periodo (1981-2011): la correlación con la precipitación en primavera aumentó, y la con las temperaturas en mayo/junio se hizo más negativa (Figuras 2 y 3). Hubo cambios parecidos en HOY (Figura 4). En el sur, la correlación con las precipitaciones en primavera fue baja durante ambos periodos, y la correlación con la precipitación en junio fue alta en el primer periodo (1950-1981), pero no se observó en el segundo; además, hubo un marcado aumento de las correlaciones positivas con las precipitaciones y las temperaturas medias y mínimas en otoño e invierno del año anterior (Figuras 5 y 6).

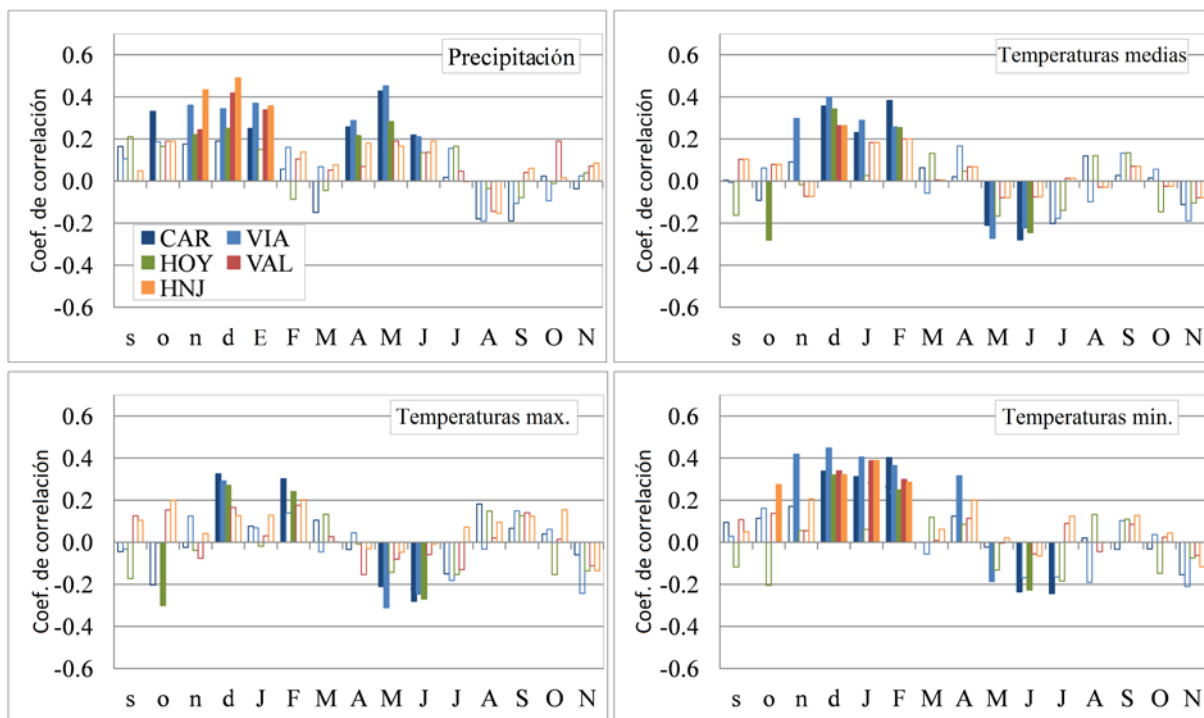


Figura 1. Correlaciones entre las cronologías maestras de anillos y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en el periodo 1950-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

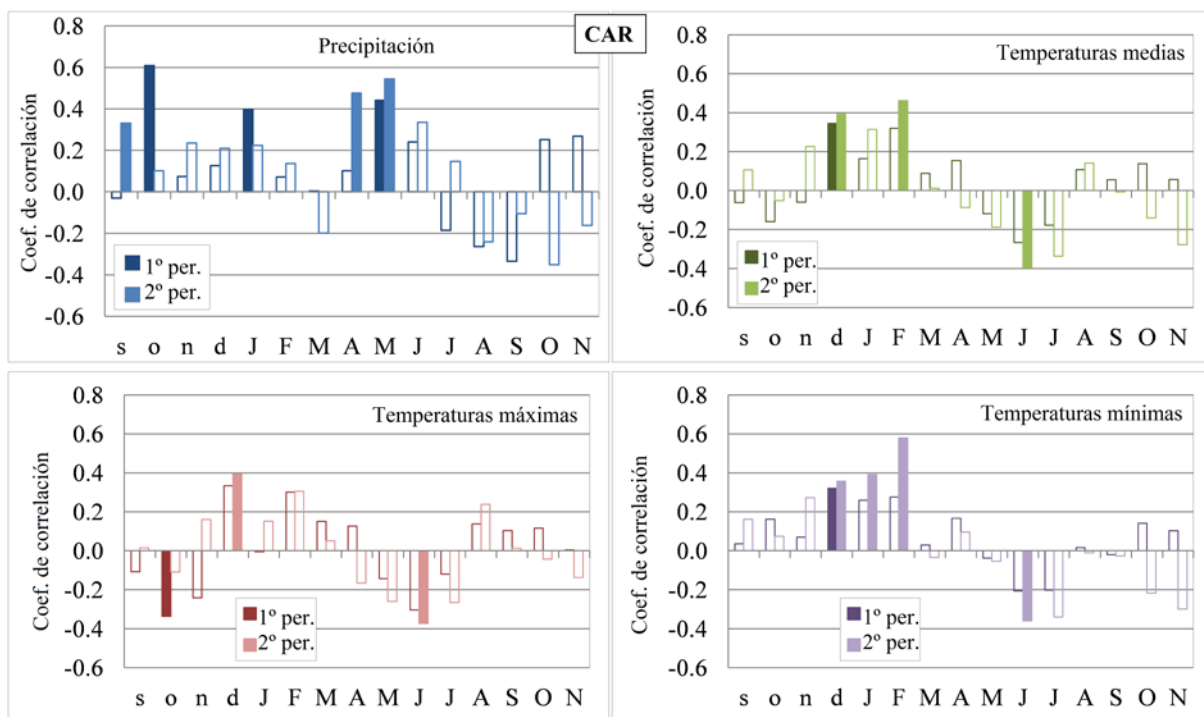


Figura 2. Correlaciones entre la cronología maestra de CAR y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

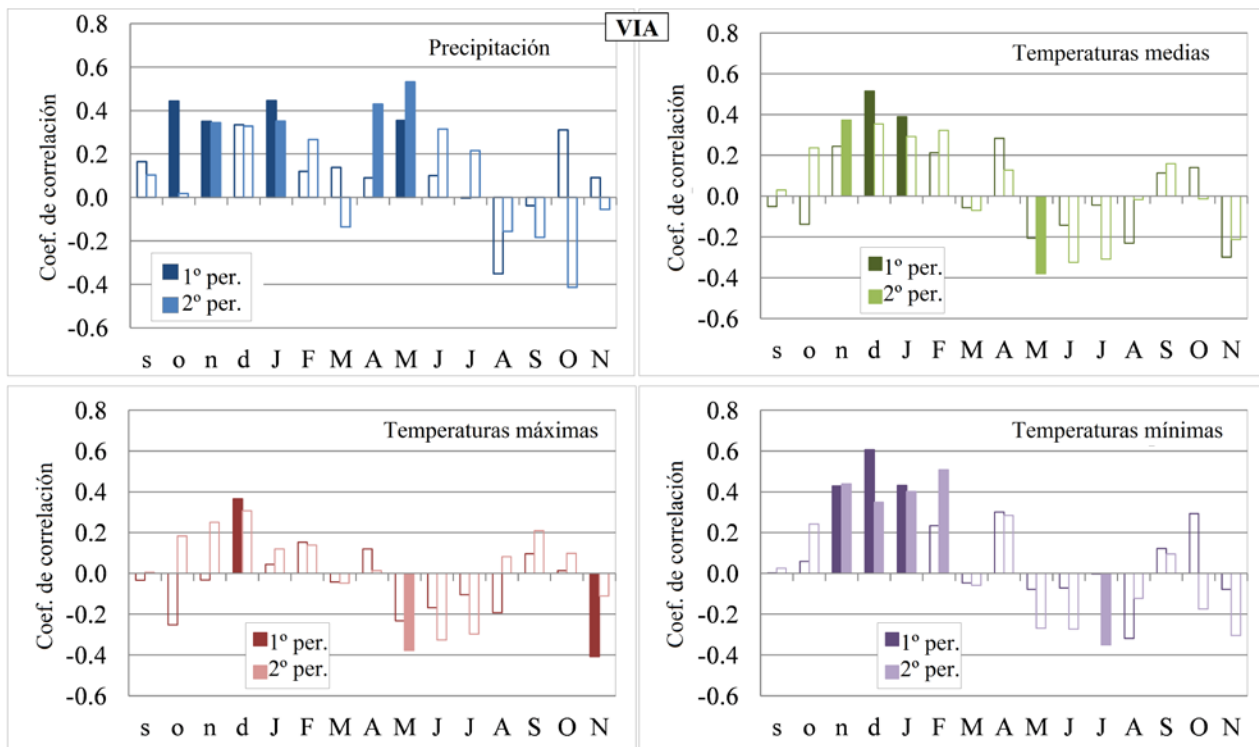


Figura 3. Correlaciones entre la cronología maestra de VIA y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

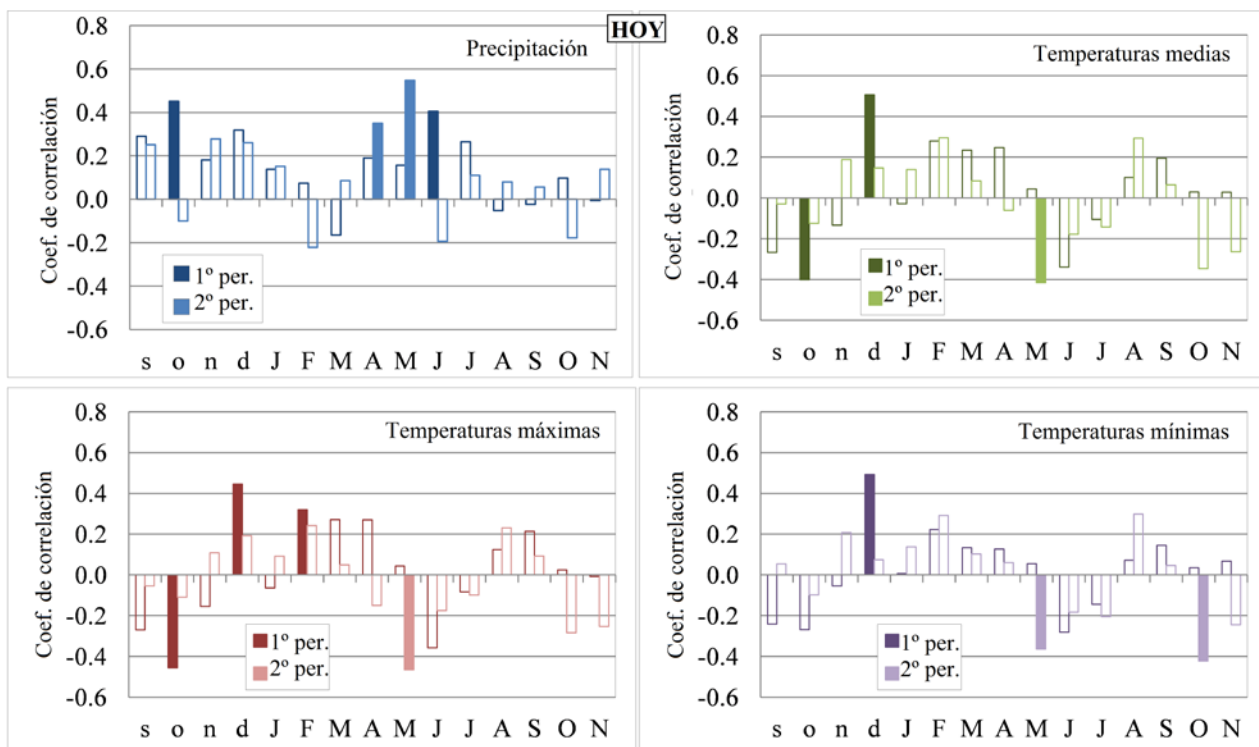


Figura 4. Correlaciones entre la cronología maestra de HOY y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

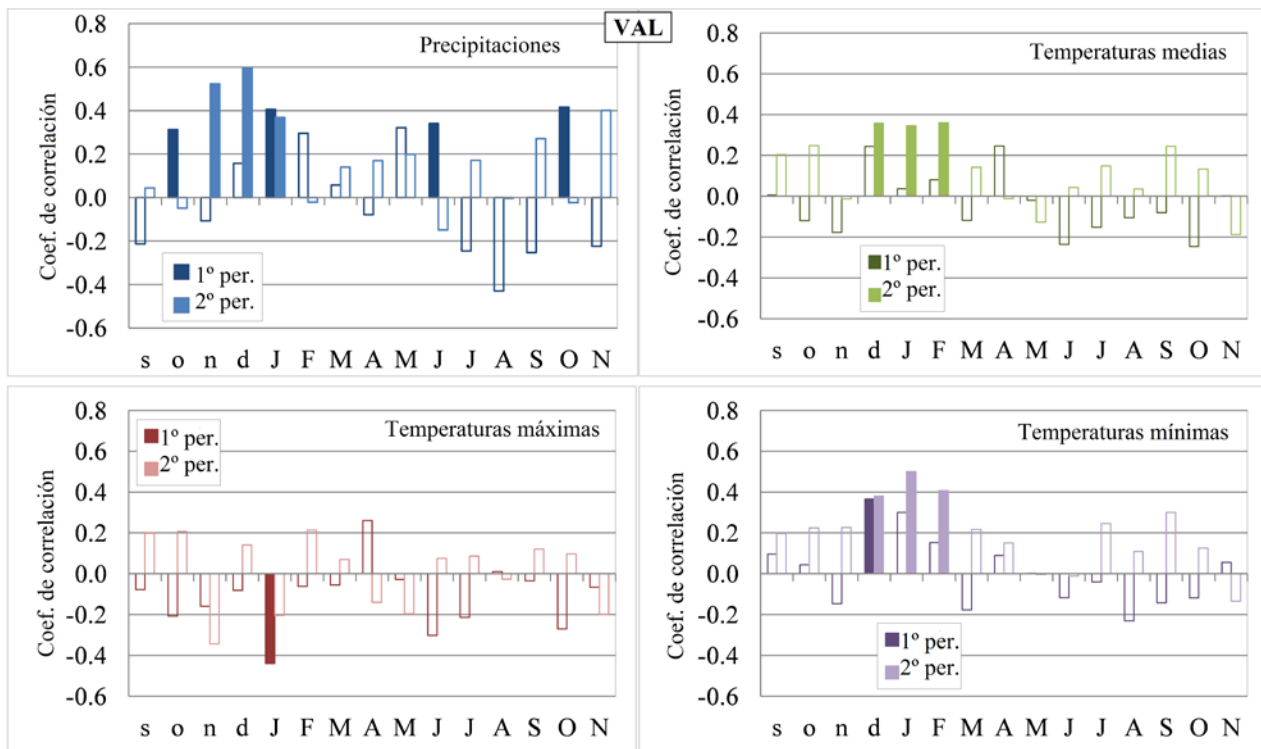


Figura 5. Correlaciones entre la cronología maestra de VAL y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

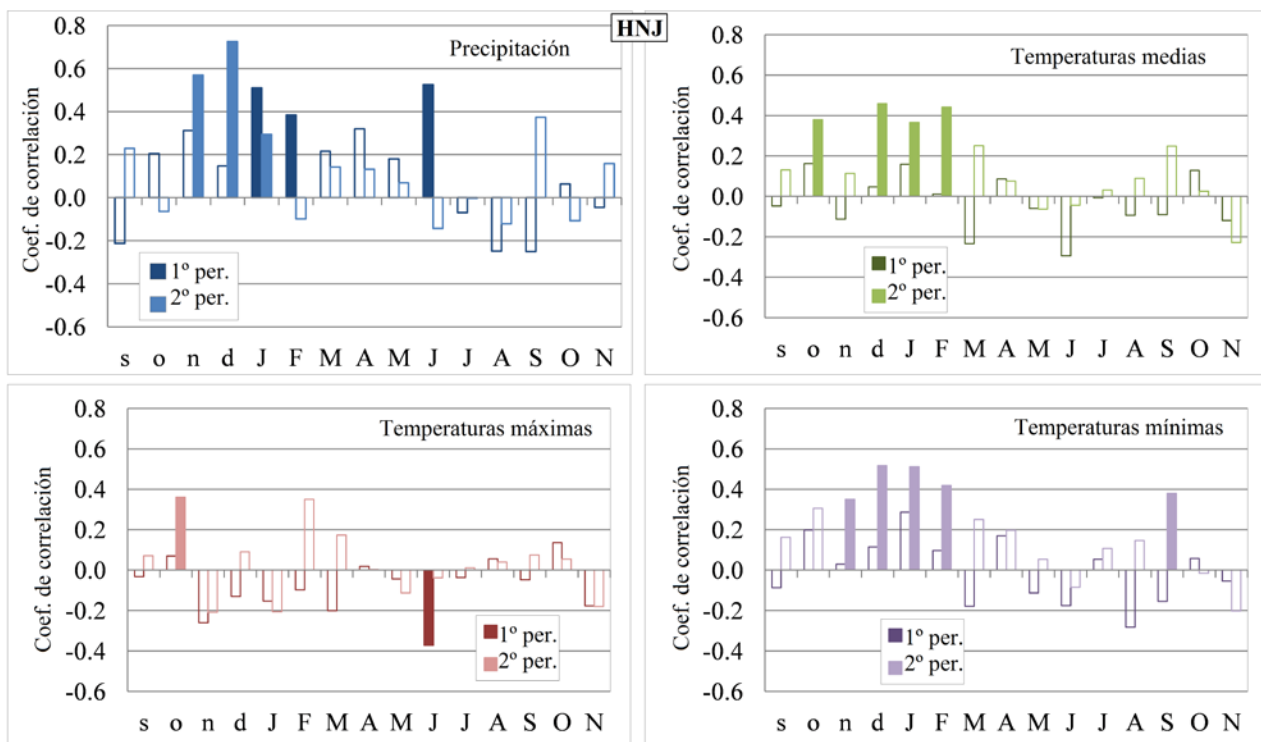


Figura 6. Correlaciones entre la cronología maestra de HNJ y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

Los valores climáticos mensuales de los dos puntos de cuadrícula E-OBS de los dos sitios del norte fueron muy parecidos. Lo mismo se observó para los dos sitios del sur. Por tanto, los climodiagramas pueden distinguirse en tres regiones climáticas: norte (que incluye CAR y VIA), centro (HOY) y sur (VAL y HNJ) (Figura 7). En el periodo 1950-2011, en el sur, las máximas precipitaciones se registraron durante los inviernos, que fueron templados. En el norte y en el centro, los inviernos fueron fríos y las precipitaciones máximas ocurrieron en primavera y en otoño. En el norte y en el centro, el inicio de la sequía estival fue más tardío que en el sur. Además, la sequía en el sur fue más intensa y más larga. La intensidad y la duración de la sequía crecieron en el tiempo: del primer periodo (1950-1980) al segundo (1981-2011), el número de meses secos ( $P < 2T$ ) aumentó de 3 (Jul-Sep) a 4 (Jun-Sep) en el norte, y de 2 (Jul-Ago) a 3 (Jul-Sep) en el centro. En el sur, los meses secos fueron 5 (May-Sep) en ambos periodos, pero la intensidad de la sequía creció debido al aumento de temperaturas desde mayo hasta agosto, y a la disminución de precipitaciones en junio.

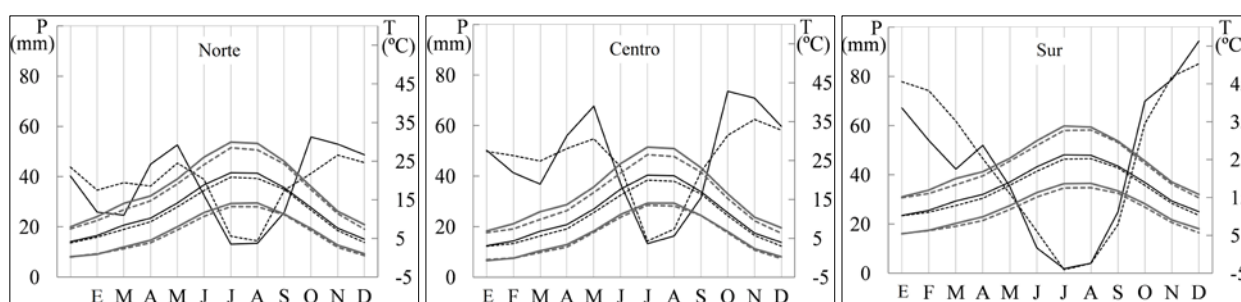


Figura 7. Climodiagramas del área norte (VIA, CAR), centro (HOY) y sur (VAL, HNJ) en el primer periodo (1950-1981, líneas de guiones) y en el segundo (1982-2011, líneas continuas). Para las temperaturas, la línea superior gris, la línea negra en el medio, y la línea inferior gris denotan las temperaturas máximas, medias y mínimas respectivamente. En el norte y en el sur, los valores mensuales se calcularon como media entre los datos climáticos dos sitios (CAR y VIA en el norte, y VAL y HNJ en el sur)

## 5. Discusión

Las similitudes entre señales dendroclimáticas en los dos sitios de la región norte, CAR y VIA, y en los dos sitios de la región sur, HNJ y VAL, reflejan la similitud de las condiciones climáticas dentro de cada región. La principales diferencias entre las señales dendroclimáticas a lo largo del gradiente latitudinal puede relacionarse con los diferentes patrones climáticos observados en los climodiagramas. Destaca la diferente sensibilidad al clima en primavera y principio del verano, que fue evidente en el norte, pero muy reducida en el sur. En estos meses, las condiciones de sequía limitan el crecimiento en el sur, por tanto la señal dendroclimática relacionada con la disponibilidad hídrica está ausente o minimizada en comparación con los otros sitios, y puede indicar una menor actividad cambial (Vieira et al., 2014). La respuesta más fuerte a las precipitaciones en primavera en CAR, VIA y HOY puede también relacionarse con el máximo de precipitaciones observado en esta estación en estos sitios. En el norte y en el centro se observó también una mayor sensibilidad a las temperaturas de mayo y junio: esto puede explicarse por los efectos negativos en la actividad cambial que puede tener en estos meses el aumento de las temperaturas, con un descenso de la disponibilidad hídrica (De Luis et al., 2011; Martín-Benito et al., 2013). Otros factores, especialmente las diferencias entre suelos, pueden influenciar el crecimiento y la productividad en los sitios de estudio (Bravo-Oviedo & Montero, 2005). Sin embargo, después de la estandarización de las series dendrocronológicas, efectuada con criterios de detrending apropiados, las señales dendroclimáticas de los dos sitios de una misma región climática fue notablemente parecida, a pesar de las diferentes condiciones geoedáficas. Por tanto, los factores no climáticos específicos de cada sitio tuvieron poca influencia y no afectaron la caracterización dendroclimática de nuestras áreas de estudio.



La capacidad de *P. pinea* de establecer distintas respuestas al clima dependiendo de las condiciones locales puede ser explicado por la plasticidad de esta especie. La variabilidad genética de *P. pinea* es baja, pero esta especie se distribuye en amplias áreas geográficas con diferentes condiciones ambientales, reflejando que la variabilidad genética no es el único componente de capacidad adaptativa de las especies (Vendramin et al., 2008). En efecto, la variabilidad fenotípica de *P. pinea* es alta y contribuye significativamente a su adaptación (Mutke et al., 2010; Sánchez-Gómez et al., 2011; Sáez-Laguna et al., 2014). Por tanto, la plasticidad fenotípica puede explicar variabilidad en la respuesta al clima observada en nuestro análisis y sugiere la capacidad de *P. pinea* de adaptar la distribución anual de la actividad cambial en función de las condiciones climáticas específicas del sitio. Los estudios de xilogénesis en esta especie que puedan testar esta hipótesis, aún son escasos (Luz et al., 2014). Por ello, en la actualidad los autores están llevando a cabo estudios de xilogénesis en pino piñonero en distintas áreas en España con el fin de aportar datos experimentales.

La variabilidad temporal de las correlaciones clima-crecimiento se puede interpretar como una forma de plasticidad fisiológica que permite a las especies aclimatarse a las condiciones cambiantes (Meyers & Bull, 2002). Los árboles pueden alterar su fisiología en respuesta a los cambios ambientales (Walther et al., 2002; Rossi et al., 2011). En nuestros sitios de estudio, las variaciones en las correlaciones clima-crecimiento sugieren un ajuste en la fisiología del crecimiento al aumento de las temperaturas y de la sequía desde los años 1970, como hemos observado en un estudio previo (Natalini et al., 2015). Sin embargo, aquí observamos también que tales variaciones indican además una influencia por parte de las condiciones específicas de cada sitio. En particular, la sensibilidad acentuada a las precipitaciones en primavera, y a las temperaturas en mayo, en VIA, CAR y HOY puede relacionarse con el aumento de las precipitaciones en el segundo periodo 1982-2011 en las regiones norte y centro. Hubo cambios diferentes en el sur, donde las precipitaciones de primavera no aumentaron y la señal dendroclimática se mantuvo baja en el tiempo. Esto sugiere que el mayor riesgo de déficit hídrico en primavera en el sur es mayor y puede inducir una respuesta fisiológica distinta de la observada en las otras regiones. La señal dendroclimática relacionada con las precipitaciones de Junio se observó en el primer periodo (1950-1981) en VAL y HNJ, pero desapareció en el periodo siguiente, lo que puede reflejar el efecto del descenso de las precipitaciones en ese mes en el segundo periodo, como revela el climodiagrama de la región sur. Estas observaciones indican que la variabilidad espacial y las variaciones temporales del clima influyen de forma simultánea la aclimatación del crecimiento de *P. pinea*.

La plasticidad de las especies puede tener un importante papel en las futuras dinámicas ecológicas (Nicotra et al., 2010). Para *P. pinea* se podría sugerir que las poblaciones septentrionales tienen la capacidad de resistir a futuros aumentos de sequía mediante una respuesta fisiológica parecida a la que caracteriza en la actualidad a las poblaciones del sur, adaptada a condiciones de mayor sequía. Por otro lado, los bosques del sur podrían encontrarse en un límite de tolerancia ecológica, lo que podría perjudicar la sostenibilidad de sus funciones: este escenario concordaría con algunos estudios que describen o predicen cambios en las distribuciones de las especies (Walther et al., 2002; Benito Garzón et al., 2008). Alternativamente, los bosques de pino piñonero del sur podrían aclimatarse mediante la activación del cambium en invierno, si las temperaturas siguieran aumentando (Prieto et al., 2004). En efecto, la actividad cambial en invierno es una característica adaptativa que algunas especies mediterráneas muestran en ciertas condiciones de temperatura y precipitación (Cherubini et al., 2003; Vieira et al., 2014). La respuesta del crecimiento al clima en invierno, observada con métodos dendroclimatológicos, podría sugerir alguna actividad cambial en esta estación. Sin embargo, se necesitan estudios de xilogénesis para validar esta hipótesis y evaluar las implicaciones en las futuras dinámicas de vegetación.

## 6. Conclusiones

Aunque los 5 sitios de estudio se caracterizan por las mismas condiciones macroclimáticas, los regímenes de precipitación y sequía, y sus cambios en el tiempo, variaron de norte a sur. La

respuesta de *P. pinea* al clima varió como consecuencia del cambio climático, pero de una manera heterogénea entre zonas de estudio. La variabilidad espaciotemporal de las relaciones clima-crecimiento sugieren que *P. pinea* puede adaptarse a varias condiciones climáticas y podrá aclimatarse a los cambios temporales en el clima. Pocos estudios han propuesto una aproximación dendroclimatológica a la plasticidad de las especies forestales. En ese contexto, nuestros resultados proporcionan una evaluación de la plasticidad de la especie *P. pinea* en España mediante series dendrocronológicas. Nuestros resultados, aunque no pueden dar conclusiones explícitas sobre la persistencia de esta especie en sus límites de tolerancia ecológica bajo un clima más árido, indican que la plasticidad de *P. pinea* puede ser crucial para las futuras dinámicas de los bosques de esta especie.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Vulnerabilidad de las masas de *Pinus pinea* ante un escenario de cambio global” (Plan Nacional I+D+i RTA2013-00011-C02-02), Ministerio de Economía y Competitividad, Unión Europea (fondos FEDER) e Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Fabio Natalini recibió una beca del Campus de Excelencia Internacional de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Global para realizar una estancia de investigación en el Instituto Federal de Investigación para el bosque, la nieve y el paisaje (WSL, Birmensdorf, Suiza), durante la cual se realizó parte de este trabajo.

## 8. Bibliografía

Benito Garzón, M.; Sánchez de Dios, R.; Sainz Ollero, H.; 2008. Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Appl. Veg. Sci.* 11 (2), 169–178

Bravo-Oviedo, A.; Montero, G.; 2005. Site index in relation to edaphic variables in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in south west Spain. *Ann. For. Sci.* 62 (1), 61–72.

Cherubini, P.; Gartner, B. L.; Tognetti, R.; Braker, O. U.; Schoch, W.; Innes, J. L.; 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biol. Rev.* 78 (01), 119–148.

De Luis, M.; Cufar, K.; Di Filippo, A.; Novak, K.; Papadopoulos, A.; Piovesan, G.; Rathgeber, C. B. K.; Raventos, J.; Saz, M. A.; Smith, K. Y.; 2013. Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS One* 8 (12), e83550

De Luis, M.; Novak, K.; Raventós, J.; Gricar, J.; Prislán, P.; Cufar, K.; 2011. Cambial activity, wood formation and sapling survival of *Pinus halepensis* exposed to different irrigation regimes. *For. Ecol. Manage.* 262 (8), 1630–1638.

Guiot, J.; 1990. Methods of calibration. En: Cook, E. R.; Kairiukstis, L. (eds.); *Methods of Dendrochronology*. 165-178. Kluwer. Dordrecht, The Netherlands

Lindner, M.; Calama, R.; 2013. Climate change and the need for adaptation in Mediterranean forests. En: Manuel Esteban Lucas-Borja, M. E. (ed.): *Forest Management of Mediterranean forests under the new context of climate change: building alternatives for the coming future*. 13-30. Nova Science Publishers. New York

Luz, A. L.; Pereira, H.; Lauw, A.; Leal, S.; 2014. Monitoring intra-annual cambial activity based on the periodic collection of twigs: a feasibility study. *Dendrochronologia* 32 (2), 162–170

- Martin-Benito, D.; Beeckman, H.; Canellas, I.; 2013. Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *Eur. J. For. Res.* 132 (1), 33–45.
- 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 (8), 927–936.
- Meyers, L. A.; Bull, J. J.; 2002. Fighting change with change: adaptive variation in an uncertain world. *Trends Ecol. Evol.* 17 (12), 551–557.
- Montero, G.; Calama R.; Ruiz-Peinado, R.; 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L. En: Serrada, R.; Montero, G.; Reque, J. A. (eds.); Compendio de selvicultura aplicada en España. 431-470. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid
- Mutke, S.; Gordo, J.; Chambel, M. R.; Prada, M. A.; Álvarez, D.; Iglesias, S.; Gil, L.; 2010. Phenotypic plasticity is stronger than adaptative differentiation among Mediterranean stone pine provenances. *For. Syst.* 19 (3), 354–366.
- Nicotra, A. B.; Atkin, O. K.; Bonser, S. P.; Davidson, A. M.; Finnegan, E. J.; Mathesius, U.; Poot, P.; Purugganan, M. D.; Richards, C. L.; Valladares, F.; van Kleunen, M.; 2010. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends Plant Sci.* 15 (12), 684–692.
- Prieto, L.; Herrera, R. G.; Díaz, J.; Hernández, E.; del Teso, T.; 2004. Minimum extreme temperatures over peninsular Spain. *Global Planet. Change* 44 (1), 59–71.
- Rossi, S. ; Morin, H. ; Deslauriers, A. Plourde, P. Y. ; 2011. Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming. *Global Change Biol.* 17 (1), 614–625.
- Sáez-Laguna, E.; Guevara Á, M.; Díaz, L. M.; Sánchez-Gómez, D.; Collada, C.; Aranda, I.; Cervera, M. T.; 2014. Epigenetic variability in the genetically uniform forest tree species *Pinus pinea* L. *PLoS ONE* 9(8), e103145
- Sánchez-Gómez, D.; Velasco-Conde, T.; Cano-Martín, F. J.; Guevara Á. M.; Cervera, M. T.; Aranda, I.; 2011. Inter-clonal variation in functional traits in response to drought for a genetically homogeneous Mediterranean conifer. *Environ. Exp. Bot.* 70 (2), 104–109
- Speer, J.H., 2010. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press, Tuscon, USA
- Vendramin, G. G.; Fady, B.; González-Martínez, S. C.; Hu; F. S., Scotti, I.; Sebastiani, F.; Soto, Á.; Petit, R. J.; 2008. Genetically depauperate but widespread: the case of an emblematic Mediterranean pine. *Evolution* 62 (3), 680–688.
- Vieira, J.; Rossi, S.; Campelo, F.; Freitas, H.; Nabais, C.; 2014. Xylogenesis of *Pinus pinaster* under a Mediterranean climate. *Ann. For. Sci.* 71 (1), 71–80.
- Walther, G. R.; Post, E.; Convey, P.; Menzel, A.; Parmesan, C.; Beebee, T. J.; Fromentin, J. M.; Hoegh-Guldberg, O.; Bairlein, F.; 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416 (6879), 389–395.

## Plasticidad en la respuesta del crecimiento de *Pinus pinea* L. a la variabilidad espaciotemporal del clima en España: una aproximación dendrocronológica

NATALINI, F.<sup>1</sup>, ALEJANO MONGE<sup>1</sup>, M. R., BÜNTGEN, U.<sup>3</sup>, CALAMA, R.<sup>2</sup>, PARDOS MÍNGUEZ, M.<sup>2</sup> y VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Campus de La Rábida, 21819 Palos de la Frontera, Huelva

<sup>2</sup> CIFOR-INIA, Ctra. de la Coruña km 7.5, Madrid 28040, Spain

<sup>3</sup> Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf, Switzerland

### Resumen

El aumento de temperatura y sequía tiene impactos en la producción de los bosques mediterráneos. El pino piñonero tiene gran valor ecológico y socio-económico en España por lo que es importante entender su respuesta al clima para evaluar su futuro estado de conservación. En este trabajo se estudian las relaciones clima-crecimiento en pino piñonero en España con métodos dendroclimatológicos en un gradiente latitudinal (Meseta Norte, Sistema Central, bajo Guadalquivir). La respuesta del crecimiento a las precipitaciones en abril-junio fue más alta en el norte. Desde los años 50, la respuesta a las precipitaciones en abril-junio aumentó en el norte y disminuyó en el sur. La estación seca empieza en junio-julio en el norte, pero en mayo en el sur, por lo que el déficit hídrico es más limitante en el sur y puede explicar la señal dendroclimática más débil en primavera/verano. Estos resultados indican la plasticidad de la respuesta al clima del pino piñonero, que podrá resistir a futuros aumentos de temperatura y sequía. Sin embargo, su capacidad adaptativa varía en su área de distribución y los bosques meridionales podrían llegar a condiciones límites de persistencia. Los resultados sugieren posibles cambios en la fisiología y en las dinámicas de población de esta especie.

### Palabras clave

Dendroclimatología; Relaciones clima-crecimiento, Cambio climático

### 1. Introducción

Varios procesos relacionados con el cambio climático se han observado en los ecosistemas forestales de la Península Ibérica. Entre ellos, variaciones en la fenología de las especies, reducciones del crecimiento forestal y de los productos no maderables, procesos de decaimiento y mortandad de los árboles, aumento de alteraciones ecológicas como plagas e incendios (Lindner & Calama, 2013). Asimismo, las proyecciones de la distribución de las especies indican cambios en el futuro (Benito Garzón et al., 2008).

Los bosques de pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en España están gestionados como bosques multifuncionales y tienen una gran importancia socio-económica y medioambiental (Montero et al., 2008). Es necesario entender los efectos del cambio climático en la ecología de esta especie para evaluar su capacidad adaptativa y para desarrollar sistemas de gestión que aseguren la conservación de las funciones de estos ecosistemas.

Los anillos de crecimiento de *P. pinea* proporcionan información sobre las relaciones entre clima y crecimiento de esta especie. Natalini et al. (2015) encontraron variaciones temporales en las correlaciones entre crecimiento de anillos y clima en bosques de pino piñonero en Andalucía occidental y Castilla-La Mancha. Estas variaciones reflejaban una respuesta al aumento de temperaturas y sequía durante las décadas 1970, 80 y 90. Sin embargo, la señal dendroclimática almacenada en las series dendrocronológicas manifiesta también variabilidad espacial, dependiendo de las condiciones climáticas específicas de distintas zonas dentro del área de distribución de la

especie (De Luis et al., 2013; Mazza et al., 2014). En España, *P. pinea* crece en áreas con diversas condiciones ecológicas y climáticas (Montero et al., 2008), por tanto se puede esperar un grado de variabilidad espacial en la señal dendroclimática de esta especie. La variedad de condiciones a las que una especie está adaptada determina la capacidad de responder a futuros cambios climáticos, y esto debe tomarse en cuenta para la modelización de los efectos del cambio climático en los ecosistemas forestales.

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es avanzar en el conocimiento sobre las dinámicas relacionadas con el clima de los bosques de pino piñonero en España. Nuestra hipótesis es que la señal dendroclimática especie-específica varía en el espacio y en el tiempo en consecuencia de la variabilidad espaciotemporal del clima. Para testar esta hipótesis, se han estudiado las relaciones clima-crecimiento y sus variaciones en el tiempo con series dendrocronológicas de pino piñonero procedentes de zonas con distintas condiciones climáticas a lo largo de un gradiente latitudinal en España.

## 3. Metodología

Las muestras dendrocronológicas se recogieron en 5 rodales maduros: “Carrascal” (CAR), “Viana de Cega” (VIA), “Hoyo de Pinares” (HOY), Valverde del Camino (VAL), e “Hinojos” (HNJ) (Tabla 1). Las muestras se tomaron con barrena forestal de Pressler y se procesaron con las técnicas dendrocronológicas estándar (Speer, 2010). Los bosques en CAR y VIA son gestionados con fines de protección (tienen una importante función de fijación de dunas continentales) y también para la producción de madera y piñón. Los bosques en VAL y HNJ se gestionan principalmente para producción maderera y de biomasa, con objetivo secundario de producción de piñón. La silvicultura en CAR, VIA, VAL y HNJ está caracterizada por claras para mejorar el desarrollo del fuste y de las copas. En HOY, el bosque tiene una función de protección hidrogeológica, la gestión selvícola es reducida y la función de producción no es importante. Las condiciones climáticas son parecidas entre los dos sitios del norte (CAR y VIA) y los dos sitios del sur (VAL y HNJ), pero varían con la latitud. La precipitación anual y la temperatura media son 404 mm y 12° C en CAR, 357 mm y 12° C en VIA, 548 mm y 11° C en HOY, 525 mm y 17° C en VAL, 527 mm y 18° C en HNJ (valores calculados a partir de la cuadrícula de datos climáticos E-OBS del proyecto EU-FP6 ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com>).

Las anchuras de anillos se midieron en centésimas de mm con un estereomicroscopio y una mesa LINTAB™ conectada al software TSAP-Win™ (Rinntech®) para la visualización y el análisis de las cronologías. La sincronización de las series se verificó mediante las técnicas de “cross-dating” (Grissino-Mayer, 2001). Para estandarizar las cronologías, se efectuó el “detrending” de las series individuales con una curva ajustada spline con una longitud de onda 30 años, se calcularon los índices de crecimiento como ratios entre los valores observados (anchuras de anillos) y los estimados por la curva de detrending, y finalmente la cronología maestra de cada sitio de estudio se calculó como media robusta entre las series de índices. Se tomaron los datos de precipitación y temperaturas (medias, máximas y mínimas) de la cuadrilla E-OBS y se calcularon las correlaciones (con método de remuestreo bootstrapping para construir los intervalos de confianza; Guiot, 1990) entre las cronologías maestras y las series climáticas en cada sitio de estudio para el periodo 1950-2011 (común entre las series climáticas y las cronologías de anillos). Además, las correlaciones se calcularon en dos periodos sucesivos de igual extensión, 1950-1980 y 1981-2011. Se construyeron los climodiagramas de cada sitio para los dos periodos para observar la variabilidad espaciotemporal del clima. Los meses en los que la precipitación en mm es menor del doble de la temperatura media en ° C ( $P < 2T$ ), se identificaron como meses secos.

Tabla 1. Localización y características de los sitios de estudio

	CAR	VIA	HOY	VAL	HNJ
Localización geográfica (provincia)	Meseta Norte (Valladolid)	Meseta Norte (Valladolid)	Sistema Central (Ávila)	Transición Sierra Morena-Valle del Guadalquivir (Huelva)	Valle del Guadalquivir (Huelva)
Latitud [°N]	41,59	41,47	40,51	37,53	37,28
Longitud [°W]	4,33	4,72	4,38	6,78	6,39
Altitud [m s. n. m.]	880	710	890	260	80
Suelo (clasificación FAO)	Cambisoles	Arenosoles	Leptosoles	Luvisoles	Cambisoles/ Regosoles
Pendiente (exposición)	0	0	50-60 (sur)	0	0
Composición del rodal	Mixto (P. pinea-Quercus ilex-Juniperus thurifera)	Puro (P. pinea)	Puro (P. pinea)	Puro (P. pinea)	Puro (P. pinea)
Altura media de los pies [m]	10	17	19	18	18
Diámetro medio de los pies [cm]	45	50	75	65	70

#### 4. Resultados

A lo largo del gradiente latitudinal estudiado se observaron distintas correlaciones clima-crecimiento. Los coeficientes de correlación significativos en los sitios del norte (CAR y VIA, Figura 1) mostraron distribuciones bimodales parecidas: hubo correlaciones positivas con la precipitación desde octubre/noviembre del año anterior al de formación del anillo hasta enero del año corriente, y de abril a junio del año corriente; las correlaciones con las temperaturas fueron positivas de diciembre a febrero y negativas de mayo a junio/julio. Correlaciones parecidas se observaron también en HOY (Figura 1). En los sitios del sur se encontró una diferente distribución en las correlaciones (VAL y HNJ, Figura 1): hubo correlaciones positivas con la precipitación desde noviembre hasta enero, pero la correlación con la precipitación en primavera no fue significativa; hubo correlación positiva con las temperaturas medias y mínimas en invierno, pero no con las máximas, y no hubo correlación con las temperaturas de verano.

Las correlaciones clima-crecimiento no fueron estables en el tiempo, y mostraron diferentes cambios temporales entre los sitios de estudio. En el norte, la distribución bimodal de los coeficientes de correlación significativos se hizo más evidente en el segundo periodo (1981-2011): la correlación con la precipitación en primavera aumentó, y la con las temperaturas en mayo/junio se hizo más negativa (Figuras 2 y 3). Hubo cambios parecidos en HOY (Figura 4). En el sur, la correlación con las precipitaciones en primavera fue baja durante ambos periodos, y la correlación con la precipitación en junio fue alta en el primer periodo (1950-1981), pero no se observó en el segundo; además, hubo un marcado aumento de las correlaciones positivas con las precipitaciones y las temperaturas medias y mínimas en otoño e invierno del año anterior (Figuras 5 y 6).

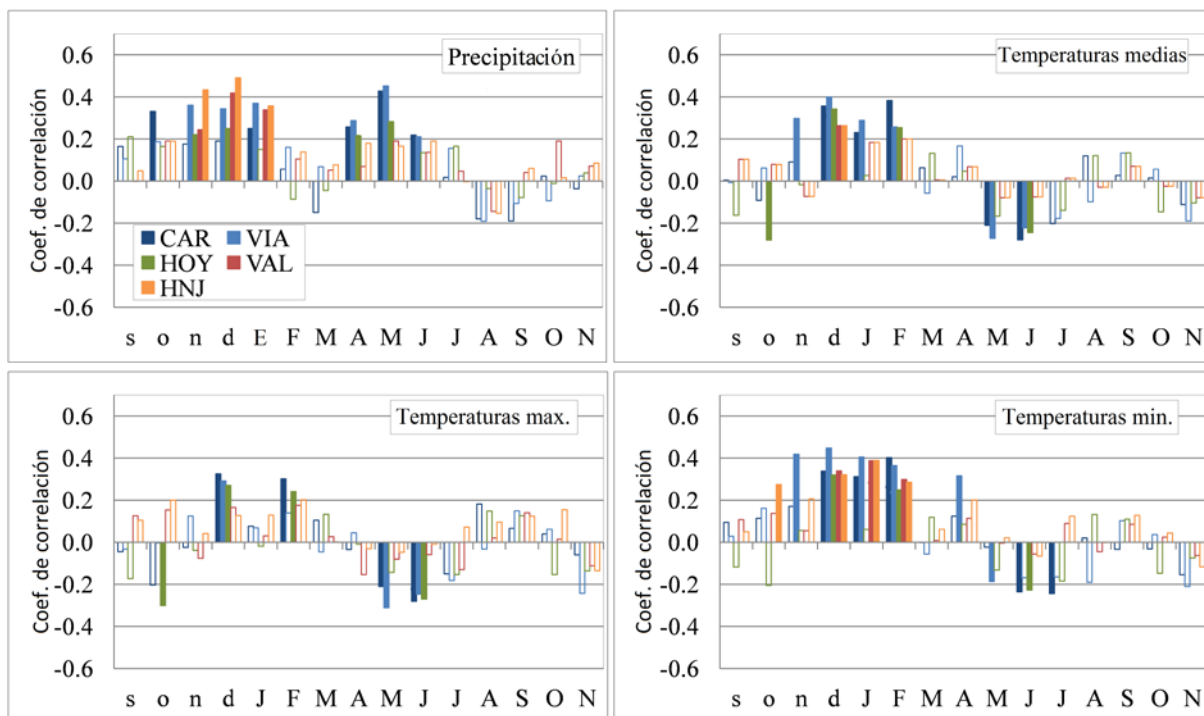


Figura 1. Correlaciones entre las cronologías maestras de anillos y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en el periodo 1950-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

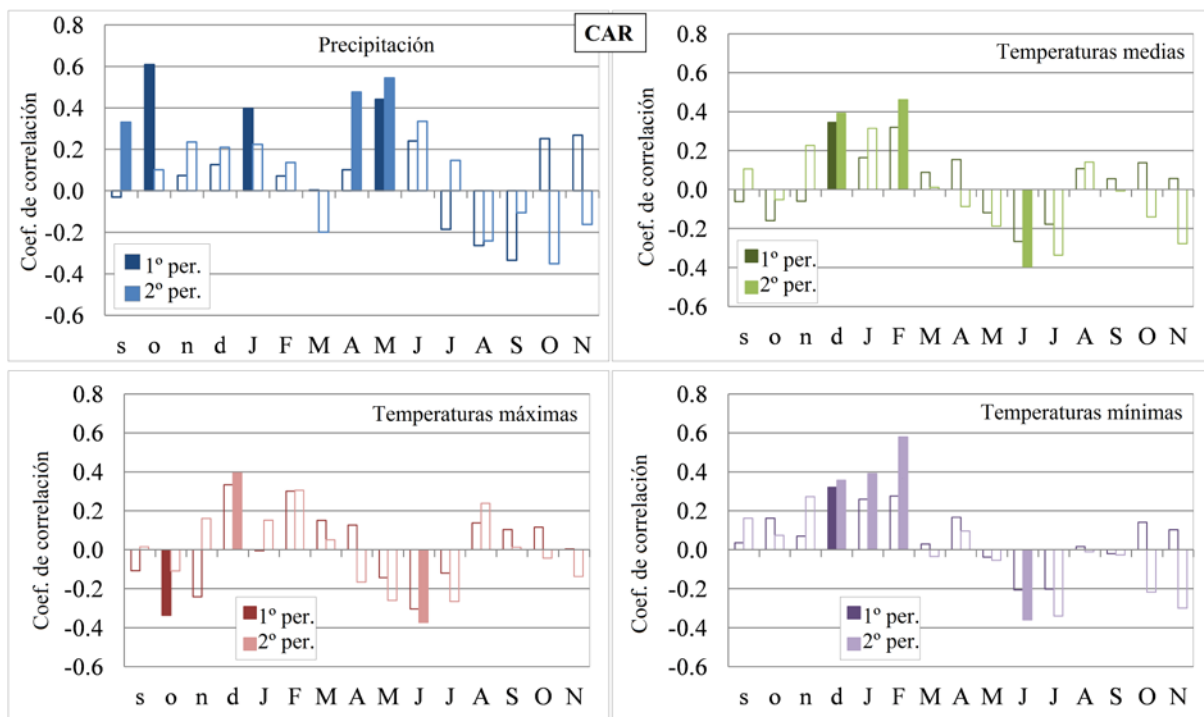


Figura 2. Correlaciones entre la cronología maestra de CAR y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

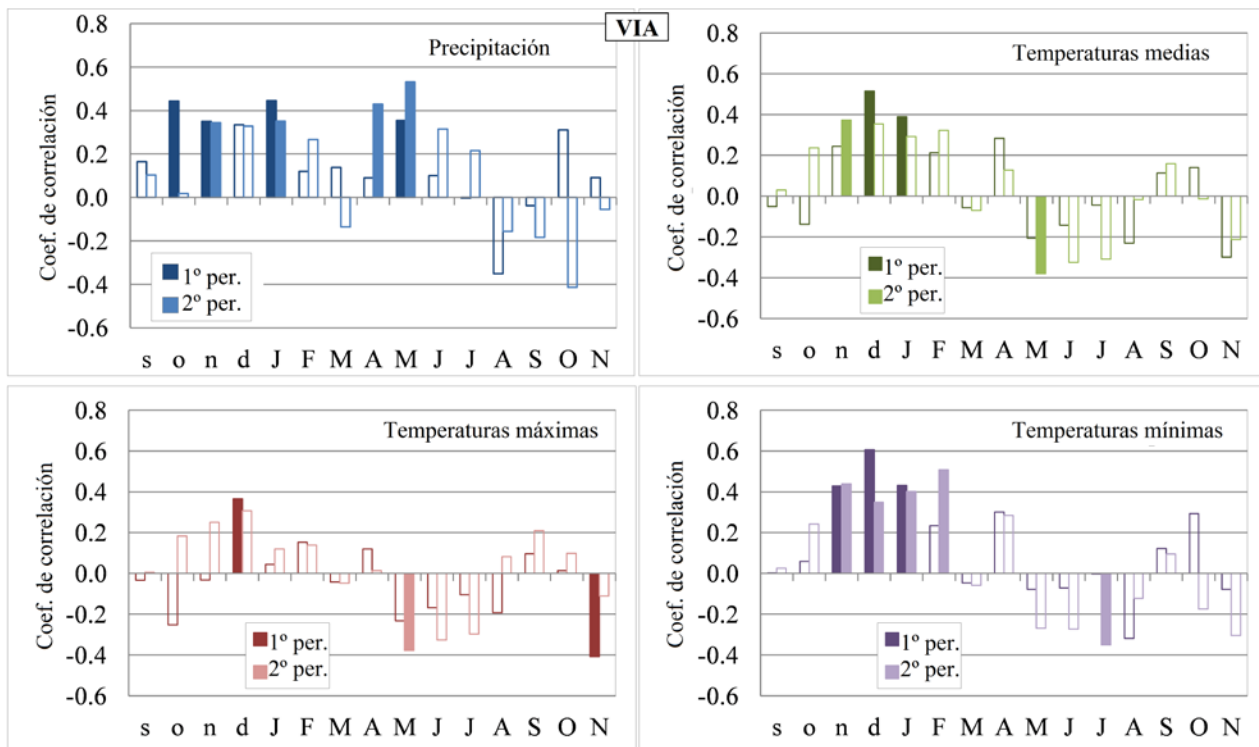


Figura 3. Correlaciones entre la cronología maestra de VIA y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

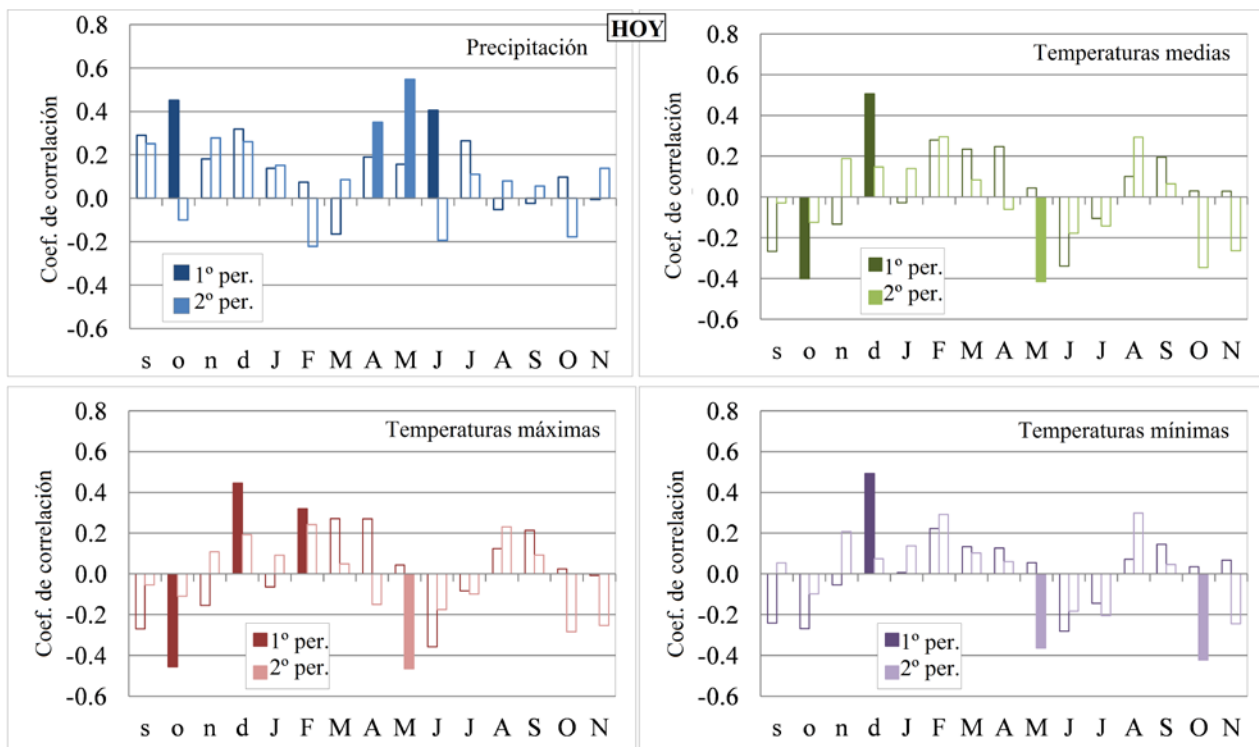


Figura 4. Correlaciones entre la cronología maestra de HOY y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).



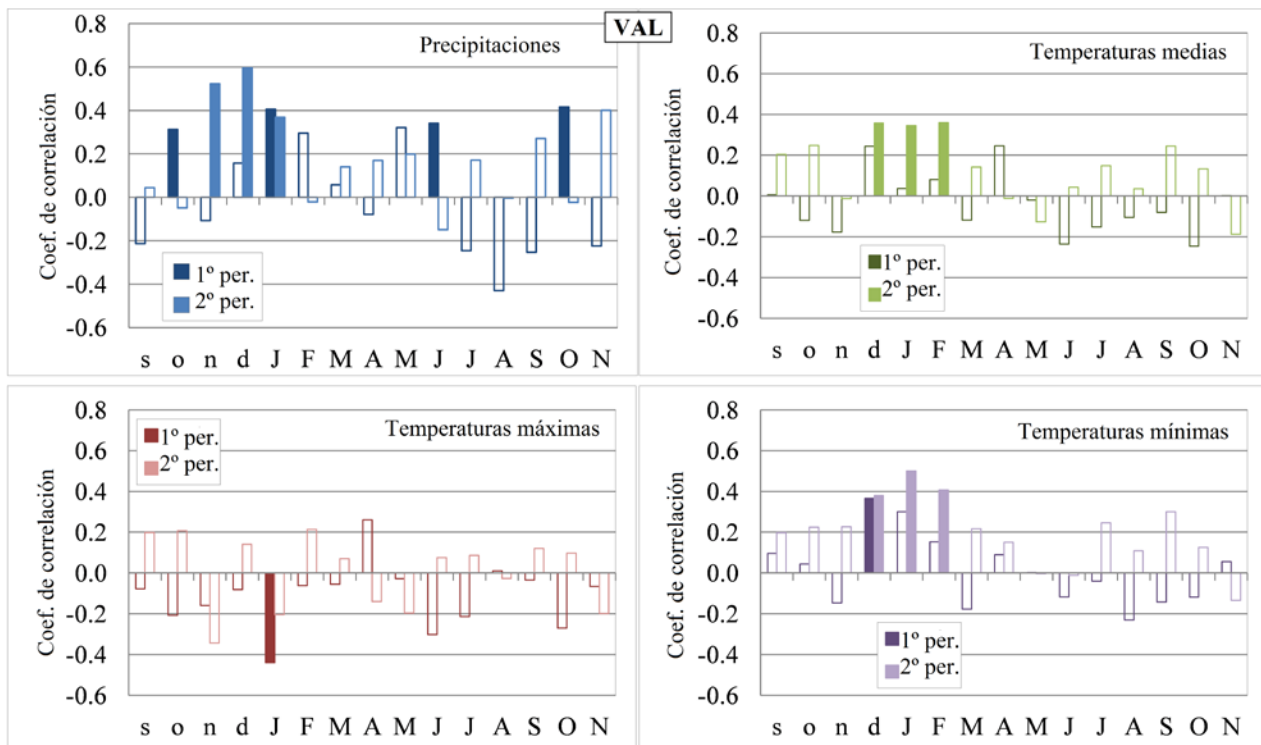


Figura 5. Correlaciones entre la cronología maestra de VAL y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

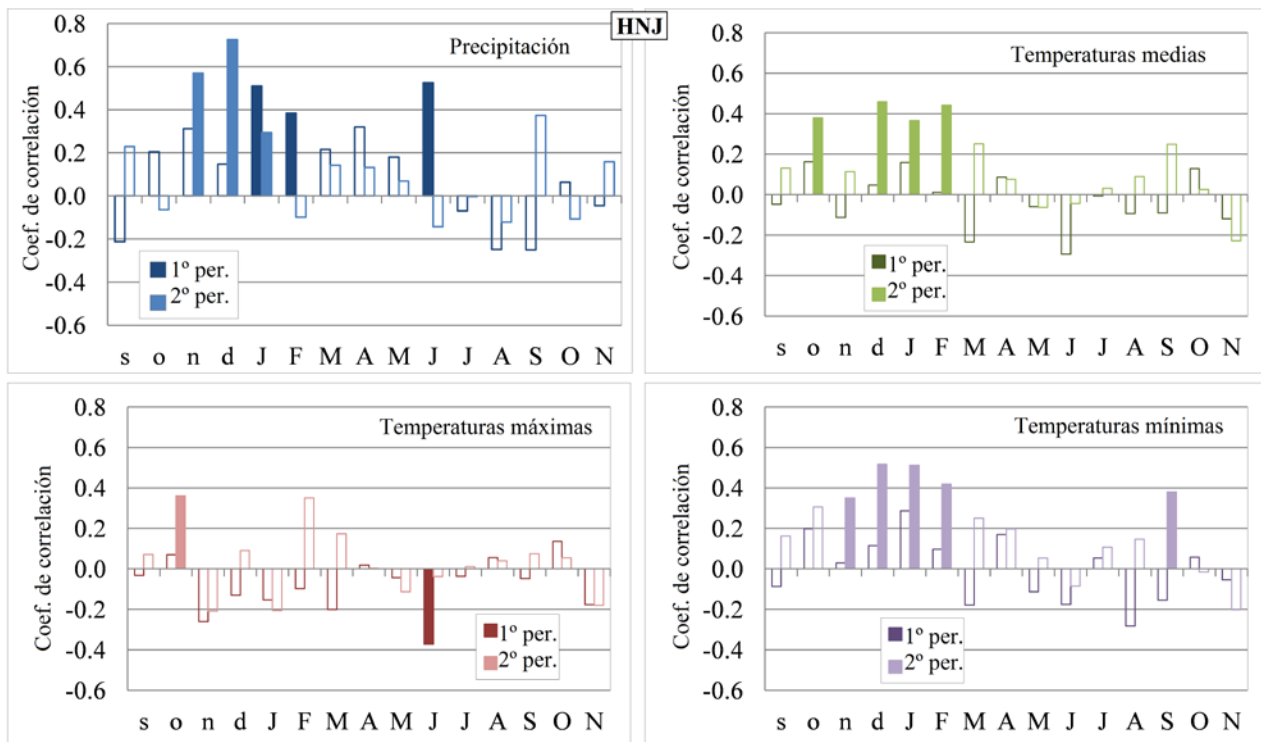


Figura 6. Correlaciones entre la cronología maestra de HNJ y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior al de formación del anillo, hasta noviembre del año corriente) de precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas, en los periodos 1950-1981 y 1982-2011. Las barras con relleno indican coeficientes de correlación significativos ( $\alpha=0,05$ ).

Los valores climáticos mensuales de los dos puntos de cuadrícula E-OBS de los dos sitios del norte fueron muy parecidos. Lo mismo se observó para los dos sitios del sur. Por tanto, los climodiagramas pueden distinguirse en tres regiones climáticas: norte (que incluye CAR y VIA), centro (HOY) y sur (VAL y HNJ) (Figura 7). En el periodo 1950-2011, en el sur, las máximas precipitaciones se registraron durante los inviernos, que fueron templados. En el norte y en el centro, los inviernos fueron fríos y las precipitaciones máximas ocurrieron en primavera y en otoño. En el norte y en el centro, el inicio de la sequía estival fue más tardío que en el sur. Además, la sequía en el sur fue más intensa y más larga. La intensidad y la duración de la sequía crecieron en el tiempo: del primer periodo (1950-1980) al segundo (1981-2011), el número de meses secos ( $P < 2T$ ) aumentó de 3 (Jul-Sep) a 4 (Jun-Sep) en el norte, y de 2 (Jul-Ago) a 3 (Jul-Sep) en el centro. En el sur, los meses secos fueron 5 (May-Sep) en ambos periodos, pero la intensidad de la sequía creció debido al aumento de temperaturas desde mayo hasta agosto, y a la disminución de precipitaciones en junio.

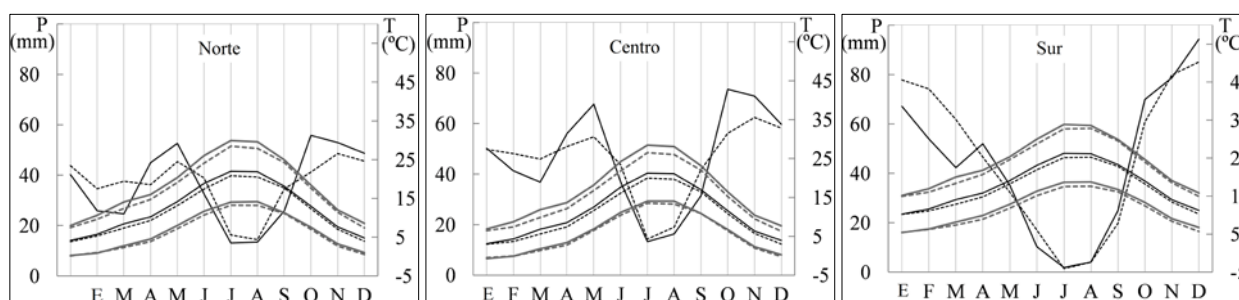


Figura 7. Climodiagramas del área norte (VIA, CAR), centro (HOY) y sur (VAL, HNJ) en el primer periodo (1950-1981, líneas de guiones) y en el segundo (1982-2011, líneas continuas). Para las temperaturas, la línea superior gris, la línea negra en el medio, y la línea inferior gris denotan las temperaturas máximas, medias y mínimas respectivamente. En el norte y en el sur, los valores mensuales se calcularon como media entre los datos climáticos dos sitios (CAR y VIA en el norte, y VAL y HNJ en el sur)

## 5. Discusión

Las similitudes entre señales dendroclimáticas en los dos sitios de la región norte, CAR y VIA, y en los dos sitios de la región sur, HNJ y VAL, reflejan la similitud de las condiciones climáticas dentro de cada región. La principales diferencias entre las señales dendroclimáticas a lo largo del gradiente latitudinal puede relacionarse con los diferentes patrones climáticos observados en los climodiagramas. Destaca la diferente sensibilidad al clima en primavera y principio del verano, que fue evidente en el norte, pero muy reducida en el sur. En estos meses, las condiciones de sequía limitan el crecimiento en el sur, por tanto la señal dendroclimática relacionada con la disponibilidad hídrica está ausente o minimizada en comparación con los otros sitios, y puede indicar una menor actividad cambial (Vieira et al., 2014). La respuesta más fuerte a las precipitaciones en primavera en CAR, VIA y HOY puede también relacionarse con el máximo de precipitaciones observado en esta estación en estos sitios. En el norte y en el centro se observó también una mayor sensibilidad a las temperaturas de mayo y junio: esto puede explicarse por los efectos negativos en la actividad cambial que puede tener en estos meses el aumento de las temperaturas, con un descenso de la disponibilidad hídrica (De Luis et al., 2011; Martín-Benito et al., 2013). Otros factores, especialmente las diferencias entre suelos, pueden influenciar el crecimiento y la productividad en los sitios de estudio (Bravo-Oviedo & Montero, 2005). Sin embargo, después de la estandarización de las series dendrocronológicas, efectuada con criterios de detrending apropiados, las señales dendroclimáticas de los dos sitios de una misma región climática fue notablemente parecida, a pesar de las diferentes condiciones geodáficas. Por tanto, los factores no climáticos específicos de cada sitio tuvieron poca influencia y no afectaron la caracterización dendroclimática de nuestras áreas de estudio.

La capacidad de *P. pinea* de establecer distintas respuestas al clima dependiendo de las condiciones locales puede ser explicado por la plasticidad de esta especie. La variabilidad genética de *P. pinea* es baja, pero esta especie se distribuye en amplias áreas geográficas con diferentes

condiciones ambientales, reflejando que la variabilidad genética no es el único componente de capacidad adaptativa de las especies (Vendramin et al., 2008). En efecto, la variabilidad fenotípica de *P. pinea* es alta y contribuye significativamente a su adaptación (Mutke et al., 2010; Sánchez-Gómez et al., 2011; Sáez-Laguna et al., 2014). Por tanto, la plasticidad fenotípica puede explicar variabilidad en la respuesta al clima observada en nuestro análisis y sugiere la capacidad de *P. pinea* de adaptar la distribución anual de la actividad cambial en función de las condiciones climáticas específicas del sitio. Los estudios de xilogénesis en esta especie que puedan testar esta hipótesis, aún son escasos (Luz et al., 2014). Por ello, en la actualidad los autores están llevando a cabo estudios de xilogénesis en pino piñonero en distintas áreas en España con el fin de aportar datos experimentales.

La variabilidad temporal de las correlaciones clima-crecimiento se puede interpretar como una forma de plasticidad fisiológica que permite a las especies aclimatarse a las condiciones cambiantes (Meyers & Bull, 2002). Los árboles pueden alterar su fisiología en respuesta a los cambios ambientales (Walther et al., 2002; Rossi et al., 2011). En nuestros sitios de estudio, las variaciones en las correlaciones clima-crecimiento sugieren un ajuste en la fisiología del crecimiento al aumento de las temperaturas y de la sequía desde los años 1970, como hemos observado en un estudio previo (Natalini et al., 2015). Sin embargo, aquí observamos también que tales variaciones indican además una influencia por parte de las condiciones específicas de cada sitio. En particular, la sensibilidad acentuada a las precipitaciones en primavera, y a las temperaturas en mayo, en VIA, CAR y HOY puede relacionarse con el aumento de las precipitaciones en el segundo periodo 1982-2011 en las regiones norte y centro. Hubo cambios diferentes en el sur, donde las precipitaciones de primavera no aumentaron y la señal dendroclimática se mantuvo baja en el tiempo. Esto sugiere que el mayor riesgo de déficit hídrico en primavera en el sur es mayor y puede inducir una respuesta fisiológica distinta de la observada en las otras regiones. La señal dendroclimática relacionada con las precipitaciones de Junio se observó en el primer periodo (1950-1981) en VAL y HNJ, pero desapareció en el periodo siguiente, lo que puede reflejar el efecto del descenso de las precipitaciones en ese mes en el segundo periodo, como revela el climodiagrama de la región sur. Estas observaciones indican que la variabilidad espacial y las variaciones temporales del clima influyen de forma simultánea la aclimatación del crecimiento de *P. pinea*.

La plasticidad de las especies puede tener un importante papel en las futuras dinámicas ecológicas (Nicotra et al., 2010). Para *P. pinea* se podría sugerir que las poblaciones septentrionales tienen la capacidad de resistir a futuros aumentos de sequía mediante una respuesta fisiológica parecida a la que caracteriza en la actualidad a las poblaciones del sur, adaptada a condiciones de mayor sequía. Por otro lado, los bosques del sur podrían encontrarse en un límite de tolerancia ecológica, lo que podría perjudicar la sostenibilidad de sus funciones: este escenario concordaría con algunos estudios que describen o predicen cambios en las distribuciones de las especies (Walther et al., 2002; Benito Garzón et al., 2008). Alternativamente, los bosques de pino piñonero del sur podrían aclimatarse mediante la activación del cambium en invierno, si las temperaturas siguieran aumentando (Prieto et al., 2004). En efecto, la actividad cambial en invierno es una característica adaptativa que algunas especies mediterráneas muestran en ciertas condiciones de temperatura y precipitación (Cherubini et al., 2003; Vieira et al., 2014). La respuesta del crecimiento al clima en invierno, observada con métodos dendroclimatológicos, podría sugerir alguna actividad cambial en esta estación. Sin embargo, se necesitan estudios de xilogénesis para validar esta hipótesis y evaluar las implicaciones en las futuras dinámicas de vegetación.

## 6. Conclusiones

Aunque los 5 sitios de estudio se caracterizan por las mismas condiciones macroclimáticas, los regímenes de precipitación y sequía, y sus cambios en el tiempo, variaron de norte a sur. La respuesta de *P. pinea* al clima varió como consecuencia del cambio climático, pero de una manera heterogénea entre zonas de estudio. La variabilidad espaciotemporal de las relaciones clima-crecimiento sugieren que *P. pinea* puede adaptarse a varias condiciones climáticas y podrá

aclimatarse a los cambios temporales en el clima. Pocos estudios han propuesto una aproximación dendroclimatológica a la plasticidad de las especies forestales. En ese contexto, nuestros resultados proporcionan una evaluación de la plasticidad de la especie *P. pinea* en España mediante series dendrocronológicas. Nuestros resultados, aunque no pueden dar conclusiones explícitas sobre la persistencia de esta especie en sus límites de tolerancia ecológica bajo un clima más árido, indican que la plasticidad de *P. pinea* puede ser crucial para las futuras dinámicas de los bosques de esta especie.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Vulnerabilidad de las masas de *Pinus pinea* ante un escenario de cambio global” (Plan Nacional I+D+i RTA2013-00011-C02-02), Ministerio de Economía y Competitividad, Unión Europea (fondos FEDER) e Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Fabio Natalini recibió una beca del Campus de Excelencia Internacional de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Global para realizar una estancia de investigación en el Instituto Federal de Investigación para el bosque, la nieve y el paisaje (WSL, Birmensdorf, Suiza), durante la cual se realizó parte de este trabajo.

## 8. Bibliografía

Benito Garzón, M.; Sánchez de Dios, R.; Sainz Ollero, H.; 2008. Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Appl. Veg. Sci.* 11 (2), 169–178

Bravo-Oviedo, A.; Montero, G.; 2005. Site index in relation to edaphic variables in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in south west Spain. *Ann. For. Sci.* 62 (1), 61–72.

Cherubini, P.; Gartner, B. L.; Tognetti, R.; Braker, O. U.; Schoch, W.; Innes, J. L.; 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biol. Rev.* 78 (01), 119–148.

De Luis, M.; Cufar, K.; Di Filippo, A.; Novak, K.; Papadopoulos, A.; Piovesan, G.; Rathgeber, C. B. K.; Raventos, J.; Saz, M. A.; Smith, K. Y.; 2013. Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS One* 8 (12), e83550

De Luis, M.; Novak, K.; Raventós, J.; Gricar, J.; Prislán, P.; Cufar, K.; 2011. Cambial activity, wood formation and sapling survival of *Pinus halepensis* exposed to different irrigation regimes. *For. Ecol. Manage.* 262 (8), 1630–1638.

Guiot, J.; 1990. Methods of calibration. En: Cook, E. R.; Kairiukstis, L. (eds.); *Methods of Dendrochronology*. 165-178. Kluwer. Dordrecht, The Netherlands

Lindner, M.; Calama, R.; 2013. Climate change and the need for adaptation in Mediterranean forests. En: Manuel Esteban Lucas-Borja, M. E. (ed.): *Forest Management of Mediterranean forests under the new context of climate change: building alternatives for the coming future*. 13-30. Nova Science Publishers. New York

Luz, A. L.; Pereira, H.; Lauw, A.; Leal, S.; 2014. Monitoring intra-annual cambial activity based on the periodic collection of twigs: a feasibility study. *Dendrochronologia* 32 (2), 162–170

Martin-Benito, D.; Beeckman, H.; Canellas, I.; 2013. Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *Eur. J. For. Res.* 132 (1), 33–45.

- 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 (8), 927–936.
- Meyers, L. A.; Bull, J. J.; 2002. Fighting change with change: adaptive variation in an uncertain world. *Trends Ecol. Evol.* 17 (12), 551–557.
- Montero, G.; Calama R.; Ruiz-Peinado, R.; 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L. En: Serrada, R.; Montero, G.; Reque, J. A. (eds.); Compendio de selvicultura aplicada en España. 431-470. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid
- Mutke, S.; Gordo, J.; Chambel, M. R.; Prada, M. A.; Álvarez, D.; Iglesias, S.; Gil, L.; 2010. Phenotypic plasticity is stronger than adaptive differentiation among Mediterranean stone pine provenances. *For. Syst.* 19 (3), 354–366.
- Nicotra, A. B.; Atkin, O. K.; Bonser, S. P.; Davidson, A. M.; Finnegan, E. J.; Mathesius, U.; Poot, P.; Purugganan, M. D.; Richards, C. L.; Valladares, F.; van Kleunen, M.; 2010. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends Plant Sci.* 15 (12), 684–692.
- Prieto, L.; Herrera, R. G.; Díaz, J.; Hernández, E.; del Teso, T.; 2004. Minimum extreme temperatures over peninsular Spain. *Global Planet. Change* 44 (1), 59–71.
- Rossi, S. ; Morin, H. ; Deslauriers, A. Plourde, P. Y. ; 2011. Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming. *Global Change Biol.* 17 (1), 614–625.
- Sáez-Laguna, E.; Guevara Á, M.; Díaz, L. M.; Sánchez-Gómez, D.; Collada, C.; Aranda, I.; Cervera, M. T.; 2014. Epigenetic variability in the genetically uniform forest tree species *Pinus pinea* L. *PLoS ONE* 9(8), e103145
- Sánchez-Gómez, D.; Velasco-Conde, T.; Cano-Martín, F. J.; Guevara Á. M.; Cervera, M. T.; Aranda, I.; 2011. Inter-clonal variation in functional traits in response to drought for a genetically homogeneous Mediterranean conifer. *Environ. Exp. Bot.* 70 (2), 104–109
- Speer, J.H., 2010. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press, Tuscon, USA
- Vendramin, G. G.; Fady, B.; González-Martínez, S. C.; Hu, F. S., Scotti, I.; Sebastiani, F.; Soto, Á.; Petit, R. J.; 2008. Genetically depauperate but widespread: the case of an emblematic Mediterranean pine. *Evolution* 62 (3), 680–688.
- Vieira, J.; Rossi, S.; Campelo, F.; Freitas, H.; Nabais, C.; 2014. Xylogenesis of *Pinus pinaster* under a Mediterranean climate. *Ann. For. Sci.* 71 (1), 71–80.
- Walther, G. R.; Post, E.; Convey, P.; Menzel, A.; Parmesan, C.; Beebee, T. J.; Fromentin, J. M.; Hoegh-Guldberg, O.; Bairlein, F.; 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416 (6879), 389–395.