

MODELADO ESPACIAL DE LA RELACIÓN CLIMA-CRECIMIENTO DE LAS ESPECIES FORESTALES PRESENTES EN EL PARQUE NATURAL DEL MONCAYO

Edurne MARTINEZ DEL CASTILLO¹, Luis Alberto LONGARES ALADRÉN¹,
Roberto SERRANO-NOTIVOLI¹, Martín DE LUIS ARRILLAGA¹

¹*Dpto. Geografía y Ordenación del territorio, Universidad de Zaragoza-IUCA,
C/Pedro Cerbuna 12, Zaragoza, Spain.*

Edurne@unizar.es, lalongar@unizar.es, rs@unizar.es, mdla@unizar.es

RESUMEN

La intensidad y espacialización de los factores climáticos que modelan el crecimiento de los bosques son de suma importancia para el diseño de actividades de gestión forestal. Además, contribuyen positivamente a la toma de decisiones orientadas a la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático sobre los bosques. El objetivo de este estudio es identificar las señales climáticas que afectan al crecimiento de los bosques en el Parque Natural del Moncayo y modelar las relaciones clima-crecimiento a lo largo del gradiente climático. Con este propósito, se creó una base de datos climática a escala mensual (precipitación y temperatura) de alta resolución a partir de las observaciones existentes para el periodo 1950-2012. Los datos se combinaron con los de crecimiento radial de los árboles obtenidos mediante técnicas dendrocronológicas. Los resultados muestran que hay cambios importantes en la forma en la que el clima influye al crecimiento a lo largo del gradiente climático. Además, los modelos construidos son capaces de predecir las relaciones clima-crecimiento, convirtiéndolos en una herramienta clave para la gestión forestal en un contexto de cambio global.

Palabras clave: Modelos predictivos, bosques, crecimiento, gradiente climático, gestión forestal.

ABSTRACT

The study of the intensity of climate factors which models forests growth and its spatial analysis are key elements to design forest management policies. In addition, it can be used for decision-making strategies aimed to adapt and mitigate climate change effects over forests. The main objectives of this study is to identify the climate parameters affecting tree growth in Moncayo Natural Park, and to model climate-growth relationships across the climatic gradient present in this mountain. For this purpose, a high resolution climate dataset was built (i.e. monthly precipitation and temperature) for the period 1950-2012. Climatic data were combined with radial tree growth data obtained from dendrochronological procedures. The results show important variations on the influence of climate over growth along the climatic gradient. Moreover, the models obtained in this study are capable to predict climate-

growth relationships, which make them a potential key tool for forest management in a changing climate context.

Key words: Predictive models, forests, growth, climate gradient, forest management.

1. INTRODUCCIÓN

El clima es uno de los condicionantes abióticos más importantes que limitan la distribución espacial de las especies, por tanto se espera que los cambios climáticos predichos para el futuro tengan un gran impacto sobre la distribución natural de las especies (IPCC, 2013). Para adaptarse a los cambios climáticos, las especies son capaces de migrar naturalmente. Sin embargo, los procesos de adaptación genética y las migraciones son muy lentos comparados con la rapidez de los cambios acontecidos en el clima durante las últimas décadas (Sáenz-Romero et al., 2016).

Una de las formas de ayuda a las especies forestales para adaptarse con mayor rapidez a los cambios es la llamada migración asistida (Koralewski, Wang, Grant, & Byram, 2015), sin embargo, para poder realizarla correctamente, requiere un profundo conocimiento sobre las influencias que el clima tiene sobre la especie en cuestión a lo largo de todo el rango de distribución para que la reforestación sea exitosa.

Para este propósito, las técnicas dendrocronológicas ofrecen resultados que pueden ser utilizados como indicadores del comportamiento y rendimiento general de las especies forestales frente a condiciones climáticas adversas (Fritts, 1972). Hay numerosos ejemplos en la literatura utilizando técnicas dendrocronológicas para el estudio del efecto que ejerce el clima sobre los bosques en gradientes altitudinales (Ponocná, Spyt, Kaczka, Büntgen, & Treml, 2016) o a escala regional (Čufar et al., 2014; De Luis et al., 2013). No obstante, hay una serie de carencias en este tipo de estudios. Por una parte, existe una falta de información en cómo responden los árboles al clima en su posible distribución potencial. Y en segundo lugar, es complicado generar un análisis continuo sobre la relación clima-crecimiento incluso dentro de los límites de distribución de la especie.

En este estudio, nuestro objetivo es analizar la respuesta al clima de los árboles en forma de crecimiento, específicamente de las hayas (*Fagus sylvatica*), pinos (*Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*) y rebollos (*Quercus pyrenaica*) a lo largo del gradiente climático-altitudinal para posteriormente modelar esas respuestas a lo largo de la distribución potencial de cada una de las especies dentro del Parque Natural del Moncayo. El objetivo final es poder predecir las relaciones clima-crecimiento en forma de modelos a lo largo de la distribución potencial de las especies y convertir esas predicciones en herramientas útiles para el diseño de medidas de mitigación orientadas a adaptar la distribución de las especies forestales a las condiciones climáticas cambiantes.

2. MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El Parque Natural del Moncayo es un espacio natural protegido de montaña situado en la cordillera Ibérica, al noreste de la Península Ibérica (Figura 1). Tiene una extensión de 11.226 hectáreas y una elevación comprendida entre los 580 metros en las zonas más bajas y los 2.314 metros de su cumbre en el Pico de San Miguel.

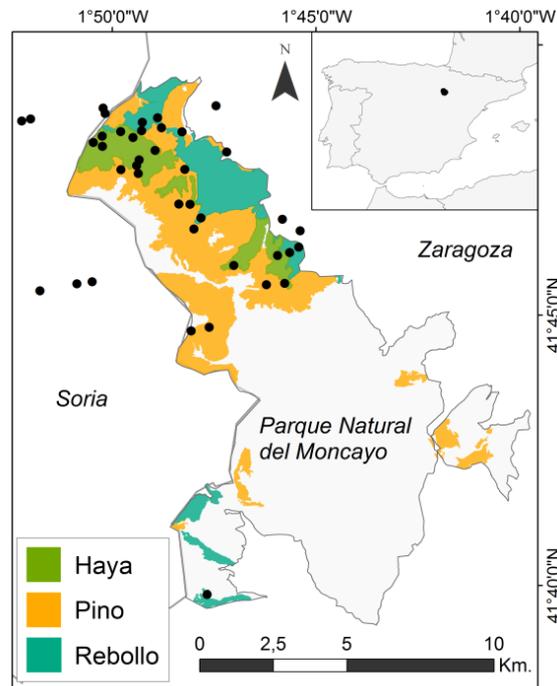


Fig. 1. Localización del área de estudio y de las cronologías.

El Moncayo está caracterizado por su gran biodiversidad, se encuentra en una zona de transición climática entre la región biogeográfica Eurosiberiana y la Mediterránea, y cuenta con numerosas especies forestales y formaciones vegetales en un espacio relativamente pequeño (Longares Aladrén, 2004). Las principales especies forestales son el haya, el pino albar y el rebollo, pero hay numerosas especies presentes como la encina (*Quercus ilex*) el roble albar (*Quercus petraea*), el acebo (*Ilex aquifolium*), el pino negro (*Pinus uncinata*), la coscoja (*Quercus coccifera*) o el abedul (*Betula pendula*) entre otros (Pellicer, 2000).

La distribución actual de las especies forestales en el Moncayo está altamente influenciada por diferentes actividades tradicionales como el pastoreo de ovejas y cabras, el carboneo y las reforestaciones (Arrechea, 2002). De esta manera, la actual distribución de estos bosques no corresponde con su distribución potencial. De forma progresiva, se han ido produciendo cambios en la cubierta forestal debido al abandono de usos tradicionales y a su protección legislativa como Espacio Natural Protegido (Martínez del Castillo, 2015; Martínez del Castillo, García-Martin, Longares Aladrén, & de Luis, 2015). En concreto, algunas formaciones forestales como el hayedo y el robleal son reconocidas como hábitats de Interés Comunitario (HIC), en relación con

los objetivos de la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres (Directiva Hábitat).

2.2. Datos climáticos

La orografía del Moncayo representa una barrera para las masas de aire provenientes del este y noreste hacia el valle del Ebro. Esto produce una actividad convectiva relativamente frecuente dando lugar a una mayor cantidad de precipitación en áreas elevadas que progresivamente disminuye hacia las cotas más bajas.

Para analizar el clima del Moncayo, se crearon tres grids de alta resolución (precipitación, temperatura máxima y mínima) usando el paquete de R *reddPrec* (Serrano-Notivoli, de Luis, & Beguería, 2017). Se generaron grids diarios para el periodo 1950-2012 con una resolución espacial de 200 metros y posteriormente se calcularon agregados mensuales, estacionales y anuales. La distribución de las precipitaciones y temperaturas está altamente condicionada por la altitud; la precipitación anual llega a los 1.500 mm en los lugares más elevados y desciende hasta los 400 mm en las cotas más bajas (Figura 2), ya temperatura media anual varía entre los 0°C de la cima hasta los 16°C de las zonas menos elevadas, con un gradiente de aproximadamente $-0,52^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

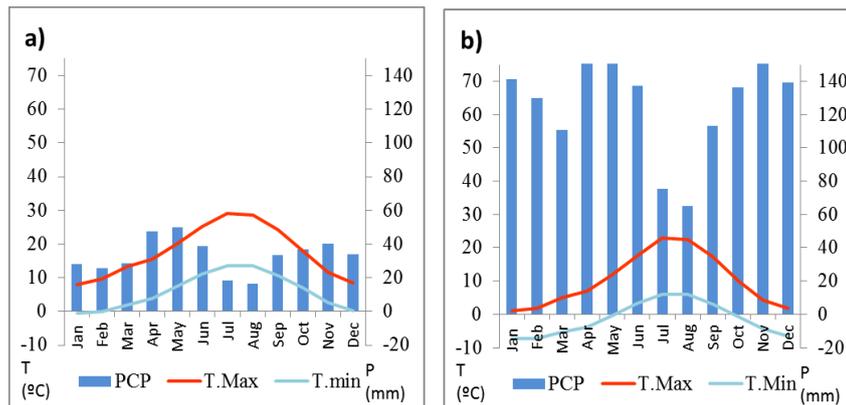


Fig. 2: Climogramas del P.N. Moncayo en la cima (2.314 m) (a) y en la cota más baja (850 metros) (b). Fuente: Datos obtenidos mediante el paquete de R *reddPrec* (Serrano-Notivoli, de Luis, & Beguería, 2017)

2.3. Análisis del crecimiento

Para este estudio, se seleccionaron 49 puntos a lo largo de gradiente altitudinal en localizaciones representativas de las diferentes especies forestales entre los años 2010 y 2014 (Tabla 1). En total, 427 árboles fueron muestreados usando barrenas de Pressler para la obtención las series de crecimiento (Figura 3). A estas series se le aplicaron procedimientos estadísticos para la eliminación de tendencias debidas a la edad del árbol o a otras perturbaciones para finalmente obtener las cronologías.

Especie	Nº de sitios	Rango altitudinal	Nº de árboles	Rango máximo de años de la cronología
<i>Fagus sylvatica</i>	15	1150-1600	150	1799-2014
<i>Pinus sp.</i>	11	1020-1900	147	1919-2014
<i>Quercus pyrenaica</i>	14	950-1500	130	1875-2013

Tabla 1: Características de las cronologías agrupadas por especies. Fuente: propia

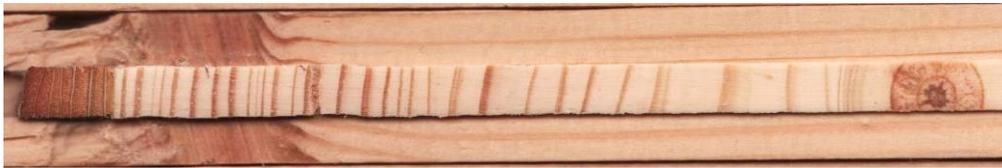


Fig. 3. Muestra de un ejemplar de *Pinus sylvestris* preparada para la medición.

Las cronologías se correlacionaron con los datos climáticos agregados estacionales desde el verano previo (junio, julio y agosto del año previo) hasta el verano en curso. Posteriormente, se exploró la variación espacial y los patrones existentes en los coeficientes de correlación a lo largo de la distribución de las especies mediante el uso de modelos lineales generalizados. En los modelos, la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima fueron incluidas como variables independientes para predecir el coeficiente de correlación. Finalmente, los modelos fueron aplicados al área de distribución potencial de cada especie dentro de los límites del Parque Natural del Moncayo.

3. RESULTADOS:

3.1. Análisis sobre las relaciones clima-crecimiento

La combinación de los datos de crecimiento radial con los relativos al clima se resume en la figura 4, que muestra los coeficientes de correlación agrupados por especies.

El principal condicionante para el crecimiento de las hayas son las condiciones de verano previo. En concreto, las precipitaciones hacen que el crecimiento sea mayor y las temperaturas máximas altas hacen que los árboles crezcan menos. Ambas situaciones ocurren de forma generalizada sobre el territorio. Por otro lado, hay variables que ejercen una influencia positiva significativa en algunas zonas y negativa en otras, como es el caso de la precipitación de invierno o la precipitación y temperatura máxima de verano.

Los pinos son fuertemente influenciados por las condiciones del verano en curso. Como en el caso de las hayas, la precipitación tiene una influencia positiva sobre el crecimiento, mientras que la temperatura máxima ejerce influencias negativas. Sin embargo, la temperatura máxima de primavera sí que favorece el crecimiento de los pinos en la mayoría de los casos. La precipitación acumulada durante la primavera tiene una influencia variable a lo largo del gradiente altitudinal de esta especie.

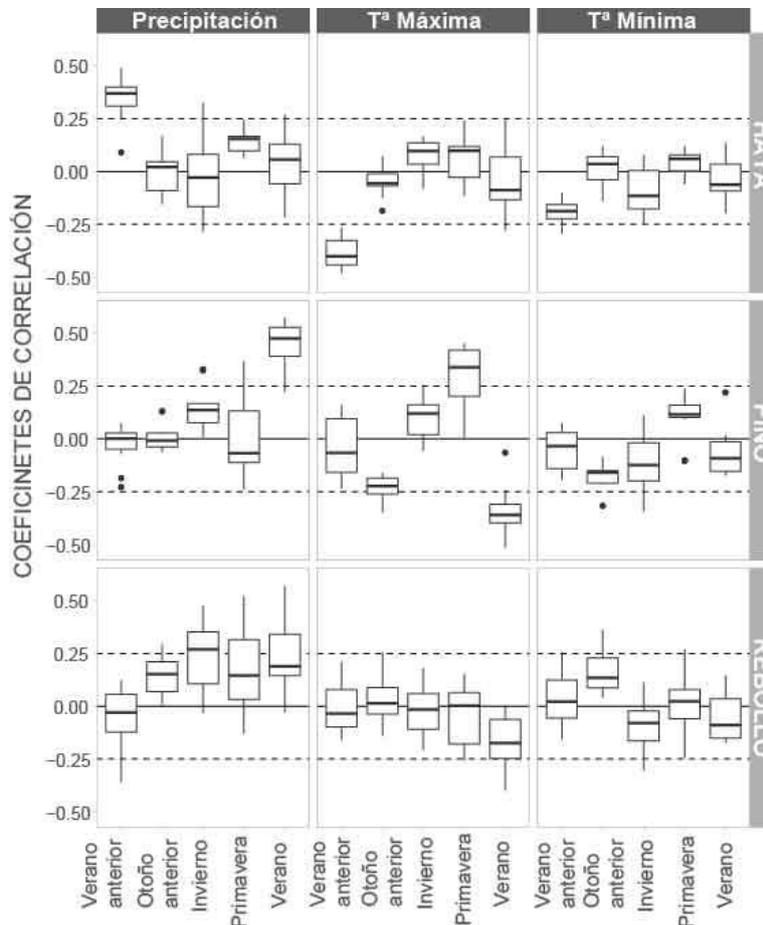


Fig. 4. Diagramas de cajas de los coeficientes de correlación.

Por otra parte, los rebollares son especialmente sensibles a las precipitaciones, siendo importantes durante todo el año, desde invierno hasta verano. La temperatura juega un papel menos importante sobre el crecimiento, a excepción de las temperaturas máximas muy altas durante el verano, que limitan el crecimiento en algunos casos.

3.2. Modelos de distribución de la respuesta clima-crecimiento

La variabilidad de los coeficientes de correlación de la relación clima-crecimiento sobre el área de estudio fue realizada aplicando modelos lineales generalizados. En total, se computaron 45 modelos, que son el producto de analizar 3 variables climáticas de 5 estaciones diferentes sobre 3 especies. En la Figura 5 se puede apreciar como varían estos coeficientes espacialmente, en la mayoría de los casos siguen patrones altitudinales, en otros latitudinales y otros modelos no presentan una variación significativa en el área de estudio.

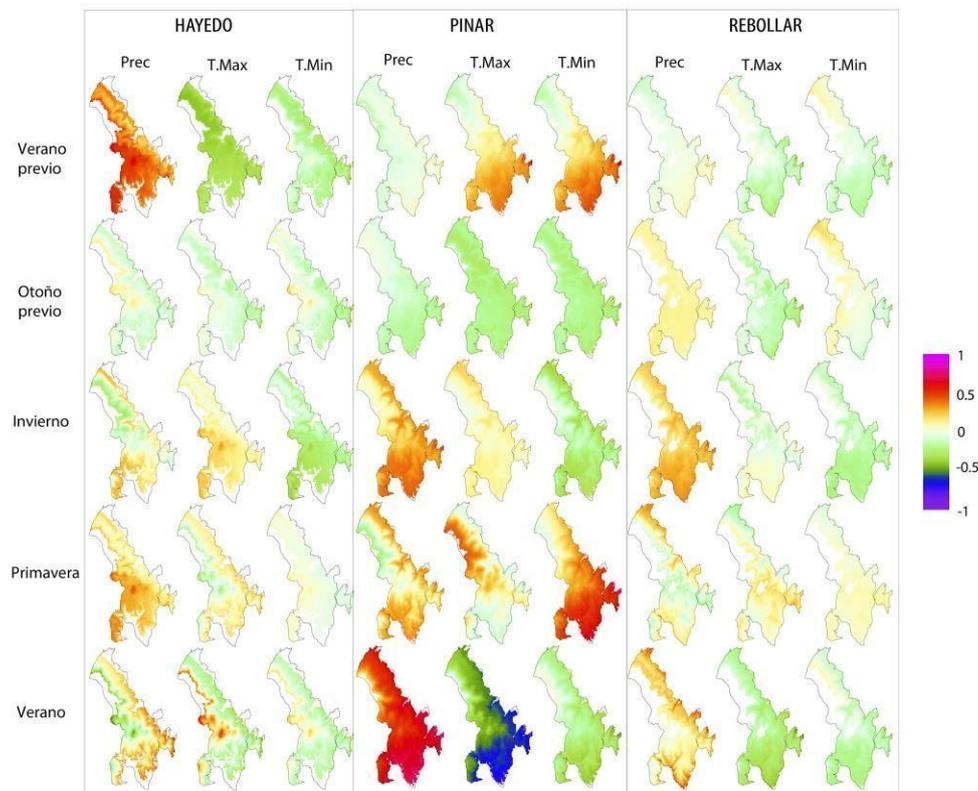


Fig. 5. Modelos de los coeficientes de correlación clima-crecimiento.

4. DISCUSIÓN

Los resultados muestran claramente como los diferentes bosques analizados tienen sensibilidades climáticas diferenciadas. Por un lado, existen diferencias entre la respuesta climática de las especies analizadas, debido a las características específicas de cada especie, aunque existen algunos elementos comunes a todas como la importancia de las condiciones de verano. Pero dentro de cada especie, se han encontrado diferencias a lo largo del gradiente altitudinal, similares a las reportadas por otros estudios llevados a cabo en áreas de montaña (Hartl-Meier, Dittmar, Zang, & Rothe, 2014; Kharal et al., 2017; Wang et al., 2017). Por último, también se han registrado variaciones importantes en la relación clima-crecimiento entre las estaciones.

Los hayedos son muy sensibles a condiciones de sequía, especialmente en verano, como se ha visto en muchos lugares de Europa (Cavin & Jump, 2016; Čufar, de Luis, Berdajs, & Prislán, 2008) y de España (Dorado-Liñán, Akhmetzyanov, & Menzel, 2017; Rozas, Camarero, Sangüesa-Barreda, Souto, & García-González, 2015). Sin embargo, en nuestros resultados observamos que esta influencia climática varía ampliamente a lo largo del gradiente; en zonas bajas, la precipitación tiene una influencia positiva sobre el crecimiento, y en las zonas altas, negativa. Esto puede ser debido a que las zonas altas, las precipitaciones vienen acompañadas de una disminución de la radiación, afectando a su capacidad fotosintética (Aranda, Gil, &

Pardos, 2000) y esto tiene un peso mayor sobre el crecimiento que la disponibilidad de agua.

Los pinares son influenciados por las condiciones del año de crecimiento y en concreto por las de verano. Esto tiene su explicación en la gran plasticidad que tiene esta especie para adaptarse a las condiciones, pudiendo disminuir su crecimiento si las condiciones de verano son muy secas y reactivando el crecimiento en otoño si vuelven las precipitaciones y las temperaturas no son muy frías (Camarero, Olano, & Parras, 2010; De Luis et al., 2011; de Luis, Gričar, Čufar, & Raventós, 2007), de hecho, los pinos son incluso capaces de no parar por completo su actividad cambial durante el invierno (Gričar et al., 2016; Prislán et al., 2016).

El crecimiento de los rebollares se ve condicionado por la disponibilidad de agua en las zonas más bajas y por tanto más cálidas. Aunque los rebollos tienen una mayor capacidad de recuperación frente a la falta de agua comparado con las hayas debido a un sistema de raíces más extenso y profundo (Aranda et al., 2000), las sequías prolongadas pueden producir una cavitación irreversible de los vasos formados en primavera, perdiendo su funcionalidad (Pérez-de-Lis, Rozas, Vázquez-Ruiz, & García-González, 2018).

CONCLUSIONES:

En nuestro estudio se demuestra que los modelos construidos de influencia climática sobre el crecimiento forestal son útiles para diseñar objetivos específicos de gestión forestal orientados a los objetivos específicos de cada especie. La aplicación de estas medidas puede ayudar a mitigar las consecuencias negativas que el cambio climático ejerce sobre los bosques. Además de por su aplicación directa, también pueden ser útiles para integrarlos en Sistemas de Soporte a Decisiones orientados a una gestión sostenible del medioambiente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza bajo los proyectos CGL2012-31668 y CGL2011-28255. Se agradece a los agentes de protección de la naturaleza del Parque Natural del Moncayo y al Servicio de Espacios Naturales y Desarrollo Sostenible, de la Dirección General de Sostenibilidad del Gobierno de Aragón por los permisos necesarios y por su ayuda en el campo.

REFERENCIAS

- Aranda, I., Gil, L., & Pardos, J. A. (2000). Water relations and gas exchange in *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. in a mixed stand at their southern limit of distribution in Europe. *Trees - Structure and Function*, 14(6), 344–352. <https://doi.org/10.1007/s004680050229>
- Arrechea, E. (2002). La gestión forestal en los espacios naturales protegidos: el ejemplo del Parque Natural del Moncayo. *Revista Ecosistemas*, 2.
- Camarero, J. J., Olano, J. M., & Parras, A. (2010). Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist*, 185(2),

- 471–480. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03073.x>
- Cavin, L., & Jump, A. S. (2016). Highest drought sensitivity and lowest resistance to growth suppression are found in the range core of the tree *Fagus sylvatica* L. not the equatorial range edge. *Global Change Biology*, 23(1), 1–18. <https://doi.org/10.1111/gcb.13366>
- Čufar, K., de Luis, M., Berdajs, E., & Prislan, P. (2008). Main patterns of variability in beech tree-ring chronologies from different sites in Slovenia and their relation to climate. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*, 87, 123–134.
- Čufar, K., Grabner, M., Morgós, A., Martínez del Castillo, E., Merela, M., de Luis, M., . . . de Luis, M. (2014). Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees - Structure and Function*, 28(5), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0972-z>
- De Luis, M., Čufar, K., Di Filippo, A., Novak, K., Papadopoulos, A., Piovesan, G., . . . Smith, K. T. (2013). Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS ONE*, 8(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083550>
- 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), 389–404. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0199-x>
- De Luis, M., Novak, K., Raventós, J., Gričar, J., Prislan, P., & Čufar, K. (2011). Cambial activity, wood formation and sapling survival of *Pinus halepensis* exposed to different irrigation regimes. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1630–1638. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.013>
- Dorado-Liñán, I., Akhmetzyanov, L., & Menzel, A. (2017). Climate threats on growth of rear-edge European beech peripheral populations in Spain. *International Journal of Biometeorology*, 61(12), 2097–2110. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1410-5>
- Fritts, H. C. (1972). Tree rings and climate. *Scientific American*, 226(5), 92–100. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0572-92>
- Gričar, J., Prislan, P., De Luis, M., Novak, K., Longares Aladrén, L. A., Del Castillo, E. M., . . . Martínez del Castillo, E. (2016). Lack of annual periodicity in cambial production of phloem in trees from Mediterranean areas. *IAWA Journal*, 37(2), 349–364. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160138>
- Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Zang, C., & Rothe, A. (2014). Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees*, 28, 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>
- IPCC. (2013). IPCC Fifth Assessment Report (AR5). *IPCC*, s. 10-12.
- Kharal, D. K., Thapa, U. K., St. George, S., Meilby, H., Rayamajhi, S., & Bhujju, D. R. (2017). Tree-climate relations along an elevational transect in Manang Valley, central Nepal. *Dendrochronologia*, 41, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.04.004>
- Koralewski, T. E., Wang, H. H., Grant, W. E., & Byram, T. D. (2015). Plants on the move: Assisted migration of forest trees in the face of climate change. *Forest Ecology and Management*, 344, 30–37.

- <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.014>
- Longares Aladrén, L. A. (2004). El paisaje vegetal en el sector aragonés del Moncayo. (Moncayo vegetal landscape in Aragón). In J. L. Peña Monne, L. A. Longares, & M. Sanchez Fabre (Eds.), *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos. (Physical Geography of Aragón. General and thematic subjects)* (pp. 187–197). Universidad de Zaragoza and Institución Fernando el Católico.
- Martínez del Castillo, E. (2015). *Análisis multitemporal de la cubierta forestal del Parque Natural del Moncayo mediante teledetección e índices de ecología del paisaje* (Serie inve). Zaragoza: Consejo de protección de la Naturaleza de Aragón.
- Martínez del Castillo, E., García-Martin, A., Longares Aladrén, L. A., & de Luis, M. (2015). Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). *Applied Geography*, 62, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.002>
- Pellicer, F. (2000). *El Moncayo*. Zaragoza: Caja de Ahorros de la Inmaculada de Aragón.
- Pérez-de-Lis, G., Rozas, V., Vázquez-Ruiz, R. A., & García-González, I. (2018). Do ring-porous oaks prioritize earlywood vessel efficiency over safety? Environmental effects on vessel diameter and tyloses formation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248(September 2017), 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.022>
- Ponocná, T., Spyt, B., Kaczka, R., Büntgen, U., & Treml, V. (2016). Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe. *Trees*. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1396-3>
- Prislan, P., Gričar, J., de Luis, M., Novak, K., Del Castillo, E. M., Schmitt, U., ... Martínez del Castillo, E. (2016). Annual Cambial Rhythm in *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* as Indicator for Climate Adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7(DECEMBER2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01923>
- Rozas, V., Camarero, J. J., Sangüesa-Barreda, G., Souto, M., & García-González, I. (2015). Summer drought and ENSO-related cloudiness distinctly drive *Fagus sylvatica* growth near the species rear-edge in northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.012>
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XXII(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., & Beguería, S. (2017). An R package for daily precipitation climate series reconstruction. *Environmental Modelling & Software*, 89, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.005>
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., Saz Sánchez, M. A., & Beguería, S. (2017). Spatially based reconstruction of daily precipitation instrumental data series. *Climate Research*, 73(3), 167–186. <https://doi.org/10.3354/cr01476>

- Wang, X., Yu, D., Wang, S., Lewis, B. J., Zhou, W., Zhou, L., . . . Li, M. H. (2017).
Tree height-diameter relationships in the alpine treeline ecotone compared
with those in closed forests on Changbai Mountain, Northeastern China.
Forests, 8(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/f8040132>