

DETERMINACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS PARA SU USO EN MODELOS DE CRECIMIENTO: UNA APROXIMACIÓN DENDROCROLÓGICA

Stella Bogino, Felipe Bravo-Oviedo y María Fernández-Nieto

Unidad Mixta UVa-INIA 'Modelización y Gestión Forestal Sostenible'. Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. ETS de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Avda. de Madrid 44. 34004-PALENCIA (España). Correo electrónico: sbogino@fices.unsl.edu.ar

Resumen

El cambio climático obliga a que los modelos empíricos desarrollados hasta la fecha deban ser recalibrados, y su estructura general repensada, con el objeto de obtener predicciones más precisas en situaciones futuras cambiantes. El objetivo de este trabajo es determinar las variables climáticas y los índices de circulación atmosférica que controlan el crecimiento de *Pinus sylvestris* L. en la Península Ibérica. Se han utilizado ocho dendrocronologías obtenidas en parcelas distribuidas en cuatro ecorregiones y en zonas de alta y baja productividad emplazadas en el Sistema Ibérico y Sistema Central Español. Las dendrocronologías estudiadas abarcan el periodo desde 1811 a 2005. Los resultados obtenidos han permitido determinar que, dentro de las variables climáticas regionales, la temperatura tiene un efecto mayor sobre el crecimiento, lo cual se sustenta en el hecho que las temperaturas máximas y mínimas también muestran un efecto significativo: inviernos más cálidos favorecerían el crecimiento en la estación siguiente, mientras que otoños con temperaturas por encima de lo normal, limitarían el incremento radial de pino silvestre durante el año siguiente. Por otra parte, el efecto positivo de la precipitación es significativo tanto en la primavera y el verano de la estación de crecimiento como en el invierno previo a la misma. Estas variables serán incluidas en modelos de crecimiento diamétrico de forma que se aumente la flexibilidad del modelo para hacer estimaciones más precisas en un contexto de cambio global.

Palabras clave: *Dendroclimatología, Pinus sylvestris, Temperatura, Precipitación, Índices de circulación atmosférica*

INTRODUCCIÓN

El cambio global es uno de los fenómenos más importantes que está afectando al planeta (IPCC, 2001), por lo tanto, es muy importante conocer cómo este ambiente cambiante podría afectar a los bosques. Estudios previos sugieren que cuando se investiga el crecimiento futuro de las especies forestales, los factores climáticos deben ser considerados (YEN & WENSEL, 2000).

La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) es la diferencia normalizada de presión entre la

estación alta subtropical de las Azores y la subpolar baja de Islandia lo que induce una alteración atmosférica a gran escala (HURREL, 1995). El fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENSO) se refiere al ciclo de calentamiento y enfriamiento del océano Pacífico en el Ecuador asociado con cambios en la presión atmosférica a lo largo del Pacífico, que se define como la diferencia entre la presión atmosférica entre Darwin, en Australia y Tahití (Índice de Oscilación Austral o SOI) (BJERKNES, 1966, 1969). La NAO y el ENSO se consideran como

la mayor fuente de variabilidad interanual del tiempo y el clima en todo el mundo (HURRELL, 1995, 1996; HURRELL & VAN LOON, 1997).

No hay estudios previos que evalúen el impacto del SOI sobre los bosques de Europa y, por otra parte, no hay estudios del impacto de la NAO sobre coníferas que crecen en la Península Ibérica. Debido a que muchos científicos sostienen que ambos índices producen un impacto global en el planeta es una excelente oportunidad analizar la relación entre esos índices y el crecimiento de las especies leñosas.

El pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) cubre un amplio espectro ecológico: a través de Eurasia, junto a otras especies, domina los sitios forestales desde la región boreal en el norte de Europa y Rusia hasta las montañas mediterráneas en el suroeste de Europa (SCHWEINGRUBER, 1996). En España, los bosques de pino silvestre caracterizan el límite forestal superior de los sistemas montañosos más importantes (Sistema Ibérico, Sistema Central, Pirineos Centrales y Sierra Nevada) donde crece entre 1000 y 2000 m.s.n.m. El bioclima de pino silvestre es frío y húmedo, muy frío y extremadamente frío bajo condiciones climáticas continentales. En su área de distribución norte la temperatura media durante el verano es menor que 20°C y durante el invierno de 7 a 3°C. La

variación de la temperatura es muy fuerte en algunos sitios de la Península Ibérica donde crece esta especie (más de 50°C durante el año). Necesita más de 600 mm de precipitación anual que no debe ser menor que 200 mm durante el verano (BLANCO et al., 1997).

La Dendrocronología ha permitido reconstruir la relación entre el crecimiento de especies leñosas y el clima, al menos, en los últimos dos mil años. La gran precisión anual y la importante repuesta climática que tienen algunos bosques convierten a esta disciplina en una excelente herramienta para recabar información sobre la variabilidad climática pasada; además, las especies que tienen el mismo patrón de crecimiento reflejan áreas climáticas o ecológicas similares que podrían ser aplicadas para caracterizar gradientes verticales u horizontales de la vegetación (BRIFFA, 2000).

El objetivo de este estudio es analizar la relación entre el crecimiento radial de *Pinus sylvestris* y los índices atmosféricos y las variables climáticas regionales en los bosques españoles. Esta relación debe ser entendida con el objeto de ser incluida en modelos de crecimiento diamétrico de tal forma que permita incrementar la fiabilidad de las predicciones bajo condiciones ambientales cambiantes.



Gráfico 1. Posición geográfica de las parcelas de *Pinus sylvestris* (cuadrados negros) en el Sistema Ibérico y Central de España

MATERIAL Y MÉTODOS

Se eligieron ocho sitios de muestreo en cuatro ecorregiones bioclimatológicas donde crece pino silvestre en la Península Ibérica (ELENA ROSELLÓ, 1997; Gráfico 1).

Se extrajeron muestras de crecimiento radial, mediante barrena de Pressler, de quince árboles dominantes y co-dominantes, a 1,30 m. de altura, en cada sitio de muestreo, durante el verano de 2006. Las muestras se pulieron y posteriormente se fecharon con la ayuda de una lupa siguiendo la metodología dendrocronológica estándar (STOKES & SMILEY, 1968). Las muestras se escanearon con alta resolución (2000 dpi) con un scanner Epson Expression 1640 XL, con una precisión del 0,01-mm. El ancho de los anillos de crecimiento se midió con el programa WinDENDRO® (Regent Instruments).

Los datos de las temperaturas medias mensuales, máximas y mínimas, la precipitación mensual y la humedad de las estaciones meteorológicas más próximas a los sitios de muestreo fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología. El programa HOM Directory Program Library for Dendrochronology (HOLMES, 1983) se empleó para determinar la homogeneidad de las variables climáticas. Los valores de la NAO y SOI se obtuvieron de la base de datos de la School of Environmental Sciences de la University of East Anglia (ROPELEWSKI & JONES, 1987; JONES et al., 1997).

Se aplicó el programa COFECHA versión 6.06P (HOLMES, 1983; GRISSINO MAYER, 2001) con el objeto de evaluar la calidad de los datos. Para eliminar la tendencia biológica de crecimiento y para eliminar las variaciones del crecimiento que no se presentan en todos los árboles (FRITTS, 1976), se empleó el programa ARS-TAN, versión 2.07 (COOK & HOLMES, 1984). La calidad de las cronologías se evaluó por medio de la sensibilidad media (SM), la relación señal / ruido (SNR) y la Señal de expresión de la población (EPS) (WINGLEY et al., 1984; FRITTS & SWETNAM, 1989; SCHWEINGRUBER, 1996).

Para determinar las variables climáticas que controlan el crecimiento de *Pinus sylvestris*, las variables climáticas regionales: precipitación mensual, temperaturas media mensual, máxima media mensual y mínima media mensual, y los

índices atmosféricos se compararon con las cronologías residuales desde Junio del año anterior hasta Septiembre de la estación de crecimiento para el período 1950-2005. Se empleó el programa PRECON versión 5.17 (FRITTS, 1999) que es un modelo estadístico que sirve para analizar la respuesta de los anillos de crecimiento a las variaciones climáticas por medio de un análisis de regresión múltiple. Los coeficientes se consideraron significantes con un nivel de confianza del 95%. El programa también incluye una función de respuesta *bootstrap* para mejorar la significación estadística de los coeficientes de regresión ($*p < 0.05$). En este análisis se realizaron 1000 iteraciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estos resultados muestran la influencia de factores climáticos sobre el crecimiento radial de pino silvestre basado en el análisis dendrocronológico de árboles dominantes y co-dominantes en ocho sitios del Sistema Ibérico y Sistema Central Español. Los estadísticos que caracterizaron las ocho cronologías residuales son la sensibilidad media que varía desde 0,1699 a 0,2709 y la desviación estándar que oscila desde 0,169 a 0,3527, de acuerdo con el sitio de muestreo. La relación señal ruido (SNR) fluctuó entre 9,118 y 24,747 y los valores de EPS variaron desde 0,901 a 0,961 (Tabla 1).

Las ocho cronologías tienen altos SNR, EPS y el porcentaje de la varianza de primer orden lo que sugiere que reflejan una fuerte señal común relacionada con los factores del ambiente. La varianza total explicada por los índices atmosféricos varía desde 9,23 a 23,53% mientras que la varianza total explicada por variables climáticas regionales varía desde 32,17 a 51,21%, en todos los sitios analizados. El gráfico 2 muestra los resultados de la relación entre las variables climáticas temperatura media mensual y precipitación mensual sobre el crecimiento radial en la parcela 1a. El total de la varianza explicada por ambas variables climáticas es 44,32%. El gráfico 3 señala la relación entre el crecimiento y los valores medios de las temperaturas mínimas y máximas en el mismo sitio de muestreo, con un 40,56% de la varianza explicada por ambas variables.

Este estudio es pionero en la Península Ibérica en el estudio de la asociación entre el

	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Período	1867-2005	1932-2005	1886-2005	1811-2005	1958-2005	1945-2005	1949-2005	1846-2005
Número de series	29	28	29	29	12	30	30	24
Número de anillos	2956	1845	2311	4803	511	1528	1538	4490
Rango de edad	81-140	55-74	83-117	99-195	36-48	40-61	46-57	127-160
DS	0,2800	0,1858	0,1690	0,2443	0,2238	0,3527	0,1973	0,3093
SM	0,2669	0,2086	0,1699	0,1919	0,2709	0,2537	0,1556	0,1816
SNR	18,823	20,13	10,588	19,898	9,118	24,747	15,309	10,676
EPS	0,950	0,953	0,914	0,952	0,901	0,961	0,939	0,914
Varianza de primer orden	43,17	46,41	31,04	45,95	49,69	54,99	38,23	35,88
Correlación entre árboles	0,402	0,436	0,274	0,434	0,432	0,518	0,345	0,308

Tabla 1. Estadística descriptiva de las ocho cronologías de *Pinus sylvestris* en España. DS: desviación estándar; SM: Sensibilidad media; SNR: Relación Señal/ruido; EPS: Señal de expresión de la población

crecimiento radial de *Pinus sylvestris* y los índices atmosféricos. Por otro lado los resultados obtenidos del análisis del impacto de variables climáticas regionales complementan estudios previos realizados en el país (GUTIÉRREZ, 1989).

Las variables climáticas habitualmente ensayadas en los modelos de crecimiento han sido la temperatura y la precipitación. Además de estas opciones ya clásicas existen otras variables climáticas regionales con un gran impacto potencial sobre el crecimiento forestal, como de las temperaturas máxima y mínima mensuales.

Dentro de las variables climáticas regionales la temperatura parece tener un efecto mayor sobre el crecimiento, lo cual se sustenta en el hecho que las temperaturas máximas y mínimas también muestran un efecto significativo: inviernos más suaves favorecerían el crecimiento en la estación siguiente, mientras que otoños muy cálidos limitarían el crecimiento de pino silvestre. Por otra parte, la precipitación es significativa tanto durante la primavera y el verano de la estación de crecimiento cuanto en el otoño previo a la misma. Los índices de circulación general producen una señal menor que las variables climáti-

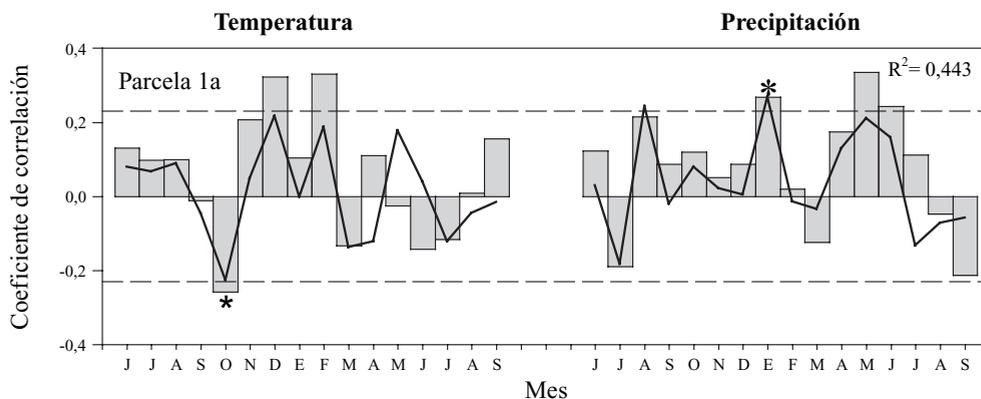


Gráfico 2. Coeficientes de correlación (barras) y coeficientes de la función de respuesta bootstrap (líneas) para la parcela 1a, entre el crecimiento radial y las variables meteorológicas: temperatura media mensual y precipitación mensual, en el periodo 1950-2005. Las barras superiores a las líneas de puntos y los asteriscos indican los coeficientes significativos a un nivel de $*p < 0,05$. El valor de R^2 indica el total de la varianza explicada por las variables climáticas analizadas

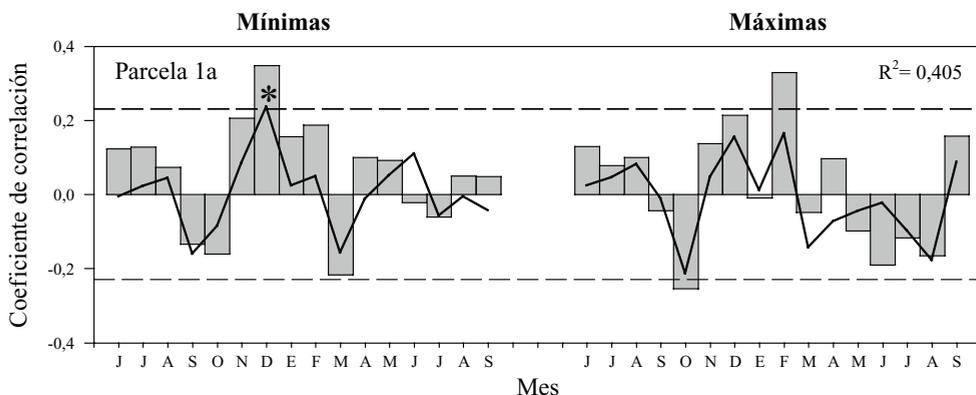


Gráfico 3. Coeficientes de correlación (barras) y coeficientes de la función de respuesta bootstrap (líneas) entre el crecimiento radial y las variables climáticas temperatura media mínima y máxima mensual, en la parcela 1a en el período 1950-2005. Las barras superiores a las líneas de puntos y los asteriscos indican los coeficientes significativos a un nivel de $*p < 0,05$. El valor de R^2 indica el total de la varianza explicada por las variables climáticas analizadas

cas y valores positivos de la NAO manifestaron un efecto negativo sobre el crecimiento del año siguiente. Estudios previos sugieren que las especies que crecen en áreas templadas no tienen una respuesta climática común (TESSIER *et al.*, 1994; DITTMAR *et al.*, 2003; PEDERSON *et al.*, 2004). En este estudio, todos los sitios analizados manifestaron una respuesta similar tanto a los índices de circulación atmosférica como a las variables climáticas regionales. Estas variables significativas deberían ser consideradas como variables potenciales para el desarrollo de modelos de crecimiento y producción.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Cristóbal Ordóñez por la ayuda recibida en el trabajo de campo. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de Investigación de la Junta de Castilla y León (España) Código: VA 096A05 y por el Programme Alþan, the European Union Programme of High Level Scholarships for Latin America, beca # E05D049920AR.

BIBLIOGRAFÍA

BJERKNES, J.; 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial

anomalies of ocean temperature. *Tellus* 18: 820–829.

BJERKNES, J.; 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.* 97: 163–172.

BLANCO, E.; CASADO, M.; COSTA, M.; ESCRIBANO, R.; GRACIA ANTÓN, M.; GÉNOVA, M.; GÓMEZ MANZANEQUE, G.; GÓMEZ MANZANEQUE, F.; MORENO, J.; MORLA, C.; REGATO, P. Y SAINZ OLLERO, H.; 1997. *Los bosques ibéricos*. Editorial Planeta. Barcelona.

BRIFFA, K.; 2000. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees. *Quat. Sci. Rev.* 19: 87–105.

COOK, E.R. & HOLMES, R.L.; 1984. *Program ARSTAN users manual*. Lab. Tree Ring. Res. Univ. of Arizona. Tucson, Arizona.

DITTMAR, C.; ZECH, W. & ELLING, W.; 2003. Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *Forest Ecol. Manage.* 173:63-78.

ELENA ROSELLÓ, R.; 1997. *Clasificación Biogeoclimática de España Peninsular y Balear*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

FRITTS, H.; 1976. *Tree Ring and Climate*. Academic Press Inc. London.

FRITTS, H.; 1999. *PRECON version 5.17*. <http://ltr.arizona.edu/webhome/hal/dlprecon.html>.

- FRITTS, H. & SWETNAM, T.; 1989. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Adv. Ecol. Res.* 19: 111-188.
- GRISSINO-MAYER, H.D.; 2001. Evaluating cross-dating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: 205-221.
- GUTIERREZ, E.; 1989. Dendroclimatological study of *Pinus sylvestris* L. in southern Catalonia (Spain). *Tree Ring Bull.* 49: 1-9.
- HOLMES, R.L.; 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bull.* 43:69-75.
- HURRELL, J.; 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269: 676-679.
- HURRELL, J.; 1996. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 23: 665-668.
- HURRELL, J. & VAN LOON, H.; 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim. Change* 36: 301-326.
- IPCC; 2001. *IPCC*. Cambridge University Press. Cambridge.
- JONES, P.D.; JONSSON, T. & WHEELER, D.; 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* 17:1433-1450.
- PEDERSON, N.; COOK, E.; JACOBY, G.; PETEET, D. & GRIFFIN, K.; 2004. The influence of winter temperature on the annual radial growth of six northern range margin tree species. *Dendrochronologia* 22: 7-29.
- ROPELEWSKI, C.F. & JONES, P.D.; 1987. An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Mon. Weather Rev.* 115: 2161-2165.
- SCHWEINGRUBER, F.; 1996. *Tree rings and environment: Dendroecology*. Haupt. Berne.
- STOKES, M. & SMILEY, T.; 1968. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press. Tucson.
- TESSIER, L.; NOLA, P. & SERRE-BACHET, F.; 1994. Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationship. *New Phytol.* 126: 355-357.
- WIGLEY, T.; BRIFFA, K. & JONES, P.; 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23: 201-213.
- YEN, H. & WENSEL, L.; 2000. The relationship between tree diameter growth and climate for coniferous species in northern California. *Can. J. For. Res.* 30: 1463-1471.