

SENSIBILIDAD Y GRADO DE ADAPTACIÓN DE *PINUS HALEPENSIS* MILL. A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PROVINCIA DE ZARAGOZA

Montserrat Ribas Matamoros¹, Emilia Gutiérrez Merino¹, Nieves Ibarra Ibáñez² y Enrique Martín Bernal³

¹ Universitat de Barcelona. Dept. d'Ecologia, Facultat de Biologia. Avda. Diagonal 645. 08028-BARCELONA (España)

² Departamento de Medio Ambiente. Dirección General del Medio Natural del Gobierno de Aragón. Unidad de la Salud de los Bosques. Avda. Montañana 930. 50059-ZARAGOZA (España). Correo electrónico: sanidadforestal@aragon.es

³ Departamento de Medio Ambiente, Dirección General del Medio Natural del Gobierno de Aragón. Pº de María Agustín nº 36, Edificio Pignatelli. 50071-ZARAGOZA (España). Correo electrónico: emartin@aragon.es

Resumen

Como parte de la prospección de la instalación de la red de seguimiento del pino carrasco y su caracterización fitosanitaria se ha llevado a cabo el estudio ecológico de tres poblaciones de dicha especie de la provincia de Zaragoza. El objetivo ha sido evaluar la respuesta del crecimiento de estos bosques al clima mediante el análisis de las series de crecimiento radial y su relación con las condiciones climáticas a distintas escalas espaciales. Los resultados obtenidos indican que el crecimiento radial del pino carrasco está fuertemente limitado por la disponibilidad hídrica; en consecuencia, éste está estrechamente relacionado con las condiciones climáticas locales. A pesar de ello, el efecto del clima regional sobre el crecimiento radial es considerable. Esta variabilidad en común, a su vez, está relacionada con fenómenos de circulación atmosférica a nivel global.

Palabras clave: *Pinus halepensis*, *Circulación atmosférica global*, *Dendrocronología*, *Región mediterránea*

ANTECEDENTES

De todos los factores abióticos que afectan la distribución geográfica de los tipos de vegetación, el clima es probablemente el más importante.

El cambio climático actual se caracteriza, en la región mediterránea, por un incremento de las temperaturas, una disminución de las precipitaciones y, un aumento de la variabilidad climática (IPCC, 2001).

En consecuencia, el estudio del grado de alteración del funcionamiento y estructura de los

ecosistemas a causa de los cambios en el clima tiene gran interés. En este sentido, como parte de la prospección de la instalación de la red de seguimiento del pino carrasco y su caracterización fitosanitaria se ha llevado a cabo el estudio ecológico de tres poblaciones de dicha especie en la provincia de Zaragoza.

El propósito principal es evaluar la respuesta del crecimiento de estos tres bosques en relación al clima. Dicho propósito se ha abordado mediante el análisis de las series de crecimiento radial y su relación con el clima a distintas escalas espaciales.

Fenómenos de circulación atmosférica global y el clima en la región mediterránea

La circulación atmosférica presenta una incesante variabilidad en todas las escalas temporales: desde horas (fenómenos mesoescalares, como tormentas o pasos de frentes) y días o semanas (configuraciones de bloqueo), hasta meses o incluso años (anomalías climáticas). Al estudiar las variaciones de baja frecuencia en la circulación atmosférica global, se han detectado modos de circulación (teleconexiones), que son identificables como persistentes anomalías de presión. Éstas, se extienden sobre grandes áreas geográficas y tienden a reproducirse en diferentes intervalos temporales. Entre los modos de circulación más conocidos destacan la Oscilación del Sur (SO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).

MATERIAL Y MÉTODOS

Selección de las masas forestales

La selección de las masas forestales objeto de estudio ha priorizado el estudio de bosques de pino carrasco longevos (es decir, de más de 100 años) y representativos de la variabilidad climática de la región. Las localidades escogidas han sido Miramón (MIR), Vedado de Peñaflores (PNF) y La Retuerta de Pina (RET). Si bien las tres localidades presentan un clima mediterráneo genuino fresco según la clasificación de ALLUÉ (1990), representan los tres subtipos climáticos que distingue la clasificación climática considerada: PNF pertenece al subtipo transicional, MIR al continental oriental, y RET al tethyco.

Trabajo de campo

El trabajo de campo ha consistido en la selección de entre 15 y 25 árboles, lo más viejos y sanos posible de cada bosque. De todos ellos, se han tomado medidas de la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP) y se han realizado observaciones generales sobre el estado fitosanitario. Se han extraído dos a más muestras (testigos de madera) de cada árbol a una altura aproximada de 1,30 cm de la base del tronco. La extracción de las muestras se ha realizado mediante el empleo de barrenas de tipo Pressler de 0,5 mm de diámetro interior.

Trabajo de laboratorio

El tratamiento de las muestras, la datación de los anillos de crecimiento, su validación estadística y la obtención de las cronologías o series promedio estandarizadas se han elaborado siguiendo la metodología estándar en dendrocronología (FRITTS, 1976; COOK & KARIUKSTIS, 1990). De esta misma manera, la cronología regional se ha construido a partir del primer componente de un análisis de componentes principales (ACP) realizado con las tres cronologías locales (PNF, MIR y RET).

Relaciones crecimiento-clima: funciones respuesta

De forma genérica, el establecimiento de relaciones crecimiento-clima se basa en la obtención de un modelo matemático o función respuesta (FR) que relaciona el crecimiento de los árboles con las variables climáticas (calibración) y, en la comprobación de la significación global del modelo obtenido (verificación). El resultado es una expresión matemática en la que la variable dependiente es el crecimiento radial y las independientes son las variables climáticas, cada una de las cuales tiene asociado un coeficiente de regresión parcial (r). Los coeficientes positivos indican una relación positiva entre el descriptor forestal (crecimiento) y la variable climática mensual considerada; es decir, que cuando más alto sea el valor de la variable climática, más crecerán los árboles. De la misma manera, un coeficiente negativo indica una relación inversa; o sea, que el crecimiento es mayor cuando más bajo sea el valor de la variable climática. En este trabajo, las FR se han obtenido mediante el análisis de regresión múltiple después de extraer los componentes principales con el paquete informático 3Pbase (GUIOT & GOEURY, 1996).

Para el análisis dendrocronológico realizado a escala local, se han usado los datos meteorológicos del observatorio más cercano a cada bosque. Las variables climáticas empleadas han sido las temperaturas medias y precipitaciones mensuales del año de formación del anillo y, las del octubre al diciembre previos a la estación de crecimiento ($n = 15$). El período analizado ha abarcado los últimos 30 años.

El estudio a escala regional de las relaciones crecimiento – clima ha considerado como serie

regional de crecimiento, los valores del primer componente del ACP realizado para las cronologías locales de las tres poblaciones. Los datos meteorológicos usados son los registrados en Zaragoza capital, y las variables climáticas empleadas son las mismas que para el análisis anterior ($n = 15$).

Finalmente, el análisis dendroclimático a escala global, también se ha basado en la cronología regional, pero como variables predictoras se han considerado distintos índices de circulación atmosférica que tienen influencia sobre el clima en la región mediterránea (NAO –Oscilación del Atlántico Norte–, SO –Oscilación del Sur–, MO –Oscilación del Mediterráneo– y WeMO –Oscilación del Mediterráneo Occidental–). En este análisis se han utilizado como predictores los valores promedio estacionales de cada índice para el año en curso (t) y con uno ($t-1$) y dos ($t-2$) años de desplazamiento.

RESULTADOS

Funciones respuesta locales

En las tres poblaciones estudiadas el modelo de función respuesta obtenido supera el 95% del nivel de confianza, y explica el 32,65% (PNF), el 36,09% (MIR) y el 42,34% (RET) de la varianza. En la figura 1 se presentan las funciones respuesta obtenidas para cada una de las tres poblaciones estudiadas, es decir, los valores de los coeficientes de regresión de las precipitaciones y de la temperatura media de cada mes.

Tal y como indica el elevado número de meses en los que el efecto de las precipitaciones sobre el crecimiento es significativo, en general, existe una considerable limitación del crecimen-

to atribuible a la falta de agua. En MIR y RET, el efecto positivo de las lluvias empieza en febrero y se prolonga hasta mayo o julio, según la duración e intervalo del período seco de cada lugar (RET y MIR respectivamente). En PNF el efecto de las lluvias es menor, de manera que tan sólo afectan el crecimiento radial del pino carrasco en junio-julio. Posteriormente, el efecto positivo de las precipitaciones se recupera con las lluvias de otoño (septiembre en PNF, septiembre-octubre en MIR, y noviembre en RET). De esta manera, atendiendo a los valores de los coeficientes de regresión parciales de las FR se desprende que: en MIR y PNF, el crecimiento del pino carrasco tan sólo se detiene como norma general en agosto, mientras que en RET éste puede detenerse en junio, julio, agosto y/o septiembre. En resumen, el crecimiento de las poblaciones de pino carrasco de la Cuenca del Ebro termina al empezar la sequía estival y se inicia con las lluvias de otoño, acusándose el patrón bimodal del crecimiento radial de la especie.

El efecto de las temperaturas medias mensuales sobre el crecimiento radial del pino carrasco en estas localidades es, en general, poco acusado (bajos r /ds); no obstante, suelen mantener una relación positiva con el crecimiento durante la primera mitad del año (hasta junio) y una relación negativa durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

Relaciones crecimiento-clima a escala regional

Las relaciones entre el crecimiento del pino carrasco y el clima a escala regional se han establecido mediante la obtención de una función respuesta en la que, las variables independientes (predictores) han sido las series de TM y PR del observatorio meteorológico de Zaragoza (capi-

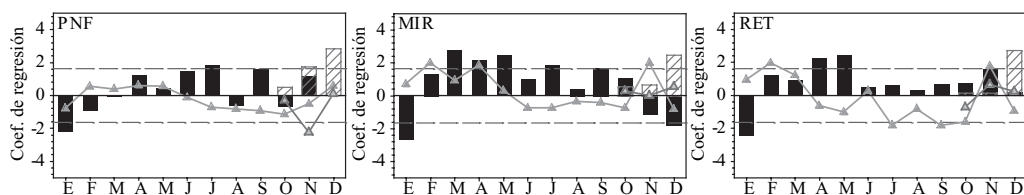


Figura 1. Coeficientes de regresión parciales (r/std) de las funciones respuesta obtenidas para las masas forestales de Vedado de Peñafior (PNF), Miramón (MIR) y La Retuerta de Pina (RET) con los datos de precipitación total (barras azules) y temperatura media (triángulos naranjas) mensuales del observatorio meteorológico más cercano a cada población. En gris, los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente)

tal). La variable dependiente, ha sido el primer componente del ACP realizado para el conjunto de las tres cronologías (PNF, MIR y RET). El modelo obtenido es significativo al 95% de nivel de confianza (R/DS de verificación 2,417), y el porcentaje de varianza en el crecimiento explicado por las variables climáticas es del 17,8%.

En general, podemos afirmar que en la función respuesta a escala regional (Figura 2), se mantienen los resultados obtenidos en las locales. Según los valores de los cocientes de regresión de las PR, las lluvias restringen el crecimiento desde marzo hasta junio y en octubre y noviembre, correspondiéndose con los dos períodos de máximo crecimiento. Los bajos cocientes de regresión en los meses de julio, agosto y septiembre indican que probablemente el crecimiento del pino carrasco se detenga, como norma general, durante estos tres meses debido tanto a la falta de agua como a las elevadas temperaturas estivales (r/ds negativos). Por otro lado, el efecto de las temperaturas es en general poco acusado (bajos r/ds), pese al efecto positivo que tienen las TM invernales previas a la estación de crecimiento (especialmente en enero). Este resultado indica que es relativamente habitual que el severo frío invernal determine un menor crecimiento del pino carrasco en la región estudiada.

Señales climáticas de ámbito global contenidas en las series de crecimiento radial del pino carrasco.

Desconocemos en qué medida el componente regional analizado anteriormente se relaciona con los fenómenos de circulación atmosférica global. Con dicho propósito, se han analizado las relaciones entre el crecimiento del pino carrasco y distintos índices de fenómenos de circulación atmosférica o teleconexiones. Para ello, se han establecido FR utilizando como variable dependiente, la serie del grosor de los anillos de crecimiento regional y, como predictores, los índices

de las teleconexiones que, según la literatura, ejercen una mayor influencia en la región mediterránea (NAOi, SOi, MOi, WeMOi).

Las FR definitivas solamente han considerado como variables independientes, aquellos índices de teleconexiones estacionales que han presentado alguna relación significativa en los análisis preliminares (realizados usando todos los valores estacionales de un mismo índice del año en curso (t), y de uno (t-1) y dos años (t-2) antes; $n = 12$ predictores). El modelo obtenido es significativo al 95% de confianza (R/DS de verificación 5,05) y el porcentaje de varianza común en el crecimiento explicada por los índices de circulación general es del 12,4%.

Las FR obtenidas (Figura 3), muestran que la sincronía en el crecimiento del pino carrasco está estrechamente relacionada con la oscilación en el Mediterráneo occidental (WeMO), especialmente durante el verano y sin existir ningún desfase temporal entre ambas variables. De esta manera, cuando el índice presenta valores positivos en verano, el crecimiento del pino carrasco es mayor, resultado que (atendiendo a los resultados de las FR locales y regionales) nos conduce a pensar que en la fase positiva de la WeMO, el gradiente de presión debería contribuir a un aumento en la pluviometría y/o a un descenso de las temperaturas. Por otro lado, se ha detectado una relación inversa (negativa) entre el índice de la WeMO y el crecimiento del pino carrasco en la Cuenca del Ebro en primavera.

DISCUSIÓN

El clima de las tres poblaciones estudiadas es muy parecido; a pesar de ello, existe una gran variabilidad climática en la provincia de Zaragoza, especialmente en relación con la pluviometría, con consecuencias importantes para el desarrollo de la vegetación.

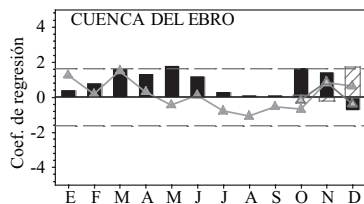


Figura 2. Cocientes de regresión parciales de la FR obtenida para la cronología regional de la Cuenca del Ebro datos de precipitación (barras) y temperatura (triángulos) mensuales para el período 1949-1999. En gris los valores obtenidos con los datos de precipitación y temperatura del año anterior al del crecimiento (barras rayadas y triángulos, respectivamente)

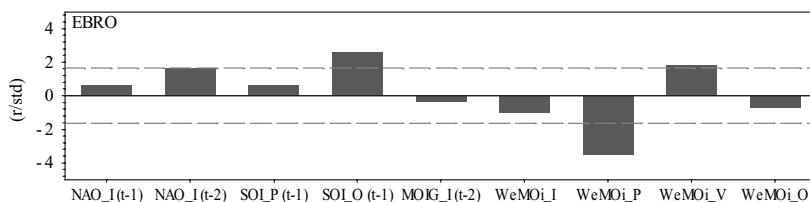


Figura 3. Función respuesta de la cronología regional del pino carrasco en la provincia de Zaragoza establecida con la combinación de los índices de teleconexiones. P, indica primavera; V, verano; O, otoño; e I, invierno; y el número (1 o 2) indica el desplazamiento temporal de las series entre sí. Las líneas horizontales discontinuas indican el umbral del 95% de nivel de confianza. (NAO, Oscilación del Atlántico Norte; SOI, Índice de Oscilación del Sur; MOIG, Oscilación del Mediterráneo en la que se calcula la diferencia de presiones normalizadas entre Israel y Gibraltar; WeMOi, índice de Oscilación del Mediterráneo Occidental)

El crecimiento radial del pino carrasco en las localidades estudiadas está alrededor del 40% de la variabilidad en las tasas de crecimiento anual del pino carrasco es explicada por las series de temperatura media y precipitación mensual en las tres localidades estudiadas. Resultados que indican que el crecimiento de esta especie responde a las condiciones climáticas locales. No obstante, la variabilidad común en el crecimiento de los árboles de las distintas poblaciones explicada a escala regional es muy elevada (cerca del 20%), y un 12,4% de dicha variabilidad se relaciona con los fenómenos de circulación atmosférica a escala global.

En el análisis de las relaciones crecimiento-clima a escala regional, se mantienen los resultados obtenidos con las series locales. Sin embargo, se pierden algunas de las variables que afectaban el crecimiento significativamente a escala local.

Se ha encontrado también una relación positiva entre el crecimiento radial del pino carrasco y el índice NAO invernal (t-2). Numerosos estudios revelan el efecto que la NAO ejerce sobre la climatología invernal en gran parte del Hemisferio Norte; y en concreto, sobre las temperaturas y precipitaciones de invierno de la región mediterránea (ZORITA *et al.*, 1992; TRIGO *et al.*, 2002; HURRELL *et al.*, 2003; RODÓ Y RODRÍGUEZ-ARIAS, 2005). A pesar de ello, no se ha encontrado ninguna cita en la bibliografía que relacione estas variables con la NAO con dos años de desfase. Sin embargo, PONS (2002), en un estudio dendroclimatológico de *P. halepensis* y *P. pinea* en las Islas Baleares, también encontró relaciones positivas y significativas con la NAO con dos años de desfase. Esta rela-

ción con dos años de desfase podría relacionarse con la variabilidad con período casi bianual que encontraron HURRELL *et al.* (2003); no obstante, los resultados que obtuvieron no fueron significativos.

Por último, también existe una relación positiva entre el crecimiento y el índice de la SO en los meses de otoño del año previo al de crecimiento. Por otro lado, el desfase en la relación entre el SOi y el crecimiento, está de acuerdo con los resultados obtenidos por RODÓ *et al.* (1997), quienes detectan que el retraso entre el principio del ENSO en invierno y el momento en el que se hace patente en la Península oscila entre 3 y 21 meses, teniendo su máximo efecto en la primavera del año siguiente.

De todas las teleconexiones analizadas (NAO, SO, MO y WeMO), ésta última es la que mejor se relaciona con el crecimiento radial del pino carrasco. Su relación es negativa en primavera y positiva en verano. También existe una cierta influencia positiva de la SO en primavera y otoño con un año de decalaje, así como una relación positiva entre el NAO y el crecimiento radial del pino carrasco en invierno con dos años de desfase.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLUÉ, J.L.; 1990. *Atlas fitoclimático de España*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.
- COOK, E.R. & KAIRIUKSTIS, L.A.; 1990. *Methods of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers. Boston.

- FRITTS, H.C.; 1976. *Tree-rings and climate*. Academic Press. London.
- GUIJARRO, J.A.; 1999. Teleconexiones climáticas y precipitación en la España mediterránea. En: J. M. Raso & J. Martin-Vide (eds.), *La climatología española en los albores del siglo XXI*: 243-251. AEC. Barcelona.
- GUIOT, J. & GOEURY, C.; 1996. PPPbase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. *Dendrochronologia* 14: 295-300.
- HURRELL, J.W.; KUSHNIR, Y.; OTTERSEN, G. & VISBECK, M.; 2003. An overview of the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Monograph Series* 134: 1-35.
- IPCC, 2001. In: The Scientific Basis. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Gig, M. Noguera, P.J. Van Der Linden, X. Day, K. Maskell & C.A. Johnson (eds.), *Climate Change*: 1-994. Cambridge University Press. Cambridge.
- MARTIN-VIDE, J.; BARRIENDOS, M.; PEÑA, J.C., RASO, J.M.; LASAT, M.C. Y RODRÍGUEZ, R.; 1999. Potencialidad del índice NAO en la previsión de episodios de alta pluviosidad en España. *Gerencia de riesgos XVII*(67): 19-31.
- PONS, S.; 2002. *Components climàtics en sèries dendrocronològiques de les Balears*. Màster en Biologia Experimental. Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona. Barcelona.
- RODÓ, X.; BAERT, E. & COMIN, F.A.; 1997. Variations in seasonal rainfall in southern Europe during the present century: relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño Southern Oscillation. *Climate Dynamics* 13: 275-284.
- RODÓ, X. Y RODRÍGUEZ-ARIAS, M.A.; 2005. El forçament antropogènic i els canvis en el clima. En: J.E. Llebot, J. Sánchez, A. Queralt, J. Rodó y Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (Catalunya). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona
- TRIGO, R.M.; OSBORN, T.J. Y CORTE-REAL, J.M.; 2002. The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research* 20: 9-17.
- ZORITA, E.; KHARIN, V. & VON STORCH, H.; 1992. The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: their interaction and relevance for Iberian precipitation. *J. Clim.* 5: 1097-1108.