



6º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

6CFE01-025

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Factores ambientales que afectan al crecimiento de las cuatro principales especies de coníferas en Cataluña

VERICAT GRAU, P.¹, PIQUÉ NICOLAU, M.¹, TRASOBARES RODRÍGUEZ, A.²

¹ Centre Tecnològic Forestal de Catalunya

² ForecoTechnologies SL

Resumen

Se estudió el efecto de distintas variables ambientales climáticas, fisiográficas y lito-edafológicas de fácil disponibilidad sobre el crecimiento de las cuatro especies más importantes de coníferas en Cataluña. Para cada especie, se seleccionaron las parcelas con AB>80% del IFN y se utilizó como indicador de crecimiento el factor aleatorio a nivel de parcela de un modelo mixto de incremento en diámetro a nivel de árbol (factor que indica la varianza no explicada por los factores de tamaño de árbol y competencia, utilizados como factores fijos en el modelo). La relación entre este indicador de crecimiento y las variables ambientales se realizó mediante regresión simple, ANOVA, regresión múltiple y CHAID.

Los resultados indican que *Pinus halepensis* y *Pinus sylvestris* se comportan como más plásticas frente a *Pinus nigra* y *Pinus uncinata*. Las cuatro especies responden de forma diferente según las variables estudiadas, pero los resultados sugieren que la disponibilidad de suelo juega un papel clave en el crecimiento de todas ellas. Los resultados del CHAID son congruentes con la regresión múltiple, pero éste método proporciona una visión más completa del fenómeno, ya que permite utilizar sin restricción variables de todo tipo y aporta información respecto a jerarquía de las variables ambientales de mayor poder discriminante.

Palabras clave

Pinus halepensis, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, crecimiento, variables ambientales, CHAID.

1. Introducción

Las variables ecológicas son de gran utilidad para estimar la calidad de estación cuando los indicadores basados en variables de la masa (e. g. *site index* SI) no son adecuados, caso de masas irregulares, mixtas o regulares sometidas a cortas diamétricas. Así, numerosos modelos de crecimiento y producción incorporan variables ecológicas para mejorar su funcionalidad (e. g. Schröder *et al.*, 2002, Trasobares *et al.*, 2004).

En el área del mediterráneo, el uso de variables ambientales para evaluar la calidad de estación reviste especial interés debido a la acusada variación a pequeña escala de las condiciones ecológicas, de estructuras y de composiciones específicas. El conocimiento de la influencia de los factores ambientales sobre el crecimiento de las especies de *Pinus* mediterráneas aporta información sobre los posibles efectos del cambio climático sobre el crecimiento y producción de las especies forestales. Dicha información también es clave a nivel económico, ya que permite determinar el régimen selvícola más adecuado de cara a la producción y regeneración. El conocimiento sobre los efectos de las variables ambientales es por tanto esencial para la toma de decisiones de política forestal, permitiendo priorizar determinadas especies de acuerdo a las condiciones ecológicas de cada zona. Por otra parte, el crecimiento diametral ha sido identificado en estudios previos (Kahle & Spiecker, 1996;

Mäkinen, 1998) como un claro indicador de los efectos ambientales sobre el crecimiento de las especies forestales, que actúa a escalas temporales cortas y medias.

En España existen numerosos estudios sobre la evaluación de la calidad de estación en base a variables ambientales para las especies de *Pinus*, la mayor parte de los cuales se basan en el SI como indicador de la calidad de estación e incluyen variables de difícil identificación en campo (e. g. % de arcilla, limo o arena; contenido de nutrientes minerales como Ca, P, N o K, C/N, etc.). Este hecho puede limitar su uso práctico por los gestores a escala de rodal o monte y también dificulta la generación de cartografías regionales de calidad de estación.

2. Objetivos

Este estudio tiene como objetivo identificar las variables ambientales clave y de fácil disponibilidad que afectan el crecimiento de las cuatro principales especies de *Pinus* en Cataluña (*Pinus halepensis*, *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*), mediante el uso de un indicador de calidad de estación basado en el crecimiento diametral (factor aleatorio a nivel parcela de un modelo mixto de incremento en diámetro). Para ello se utilizaron los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN) (ICONA, 1993; DGCN, 2001), relacionando el indicador de crecimiento con una serie de variables ambientales de fácil identificación o disponibilidad mediante regresión múltiple y *Chi-square automatic interaction detection* (CHAID).

3. Metodología

3.1. Parcelas del IFN utilizadas

Se utilizaron las parcelas del IFN2 e IFN3 de Cataluña. De todas las parcelas disponibles, se seleccionaron aquellas medidas en el IFN2 (1989-90) y remedidas en el IFN3 (2000-2001) y que además correspondiesen a masas puras (una especie representaba más del 80% del AB). Así, el número total de parcelas fue de 1.193 para *Pinus halepensis*, 537 para *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, 943 para *Pinus sylvestris* y 360 para *Pinus uncinata*.

3.2. Cálculo del indicador de crecimiento (IC) a nivel de parcela

En primer lugar, se ajustó un modelo de incremento diametral de árbol para cada una de las cuatro especies a partir de los datos del IFN, según se describe en Trasobares *et al.* (2004). Se ajustaron modelos mixtos mediante mínimos cuadrados generalizados (GLS), dividiendo la variación residual entre provincia, parcela y árbol. Los modelos se estimaron mediante el procedimiento de máxima verosimilitud con PROC MIXED en SAS/STAT. Los modelos de incremento diametral elaborados siguen la expresión general:

$$\ln(id10_{lkt}) = \beta_0 + \beta_n \times f(\text{variables dendrométricas o dasométricas})_n + u_l + u_{lk} + e_{lkt}$$

donde *id10* es el crecimiento futuro (cm en 10 años), los subíndices *l*, *k* and *t* se refieren a la provincia *l*, parcela *k*, y árbol *t*, respectivamente, y *u_l*, *u_{lk}* y *e_{lkt}* son los factores aleatorios (independientes e idénticamente distribuidos) de provincia, parcela y árbol. Inicialmente, los tres factores aleatorios se incluyeron en el modelo, pero el factor provincia no resultó significativo y se excluyó del modelo definitivo.

El indicador de crecimiento (IC) se obtuvo calculando el factor aleatorio a nivel parcela (*u_{lk}*). Este factor aleatorio puede relacionarse con los factores ambientales que afectan a la parcela (Trasobares *et al.*, 2004), dado que indica la variación entre el crecimiento de las diferentes parcelas no explicada por los factores de árbol y de masa, que se encuentran

incluidos en la parte fija del modelo. Este indicador es conceptualmente equivalente al ratio crecimiento observado *vs* crecimiento calculado (utilizado en Trasobares & Pukkala, 2004 y Vericat *et al.*, 2009) pero integrando la estructura jerárquica de los datos del IFN.

Las unidades del IC son $\ln(\text{cm}/10\text{años})$. IC cumple las hipótesis de normalidad, independencia y homocedasticidad, y por tanto puede utilizarse en procedimientos paramétricos.

3.3. Variables ambientales

Para cada parcela, se obtuvieron los valores o categorías de las siguientes variables ambientales:

a) Variables climáticas

Obtenidas a partir del Atlas climático de Cataluña (Pons, 1996, Ninyerola *et al.*, 2000): radiación solar media anual (RAD_AN, en $10 \text{ KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{micrometro}$), precipitación media anual (PREC_AN, en mm), precipitación media invernal (D+E+F) (PREC_WI, en mm), precipitación media de primavera (M+A+M) (PREC_SP, en mm), precipitación media estival (J+J+A) (PREC_SU, en mm), precipitación media de otoño (S+O+N) (PREC_AU, en mm), temperatura media anual (TM_AN, en °C), temperatura media del mes de julio (TM_JUL en °C), temperatura media del mes de enero (TM_JAN, en °C), media de la temperatura máxima anual (TMMAX_AN, en °C), media de la temperatura mínima anual (TMMIN_AN, en °C), media de la temperatura máxima diaria del mes de julio (TMMAX_JUL, en °C) y media de la temperatura mínima diaria del mes de enero (TMMIN_JAN, en °C).

b) Variables fisiográficas y topográficas

Altitud (m), pendiente (%), orientación (°) y distancia al mar (DIST_MAR) a partir del Mapa topográfico de Cataluña 1:5000 (Institut Cartogràfic de Catalunya, 2006). La orientación se dividió en las siguientes clases: llano; N (337.5-22.5°); N-E (22.5-67.5°); E (67.5-112.5°); S-E (112.5-157.5°); S (157.5-202.5°); S-W (202.5-247.5°); W (247.5-292.5°) y N-W (292.5-337.5°).

También se obtuvo la posición fisiográfica a partir de un MDT de 30×30 m de resolución derivado del Mapa topográfico de Cataluña 1:5000 (Institut Cartogràfic de Catalunya, 2006), clasificando cada píxel según las seis clases definidas por Pennock *et al.* (1987): crestas (CRESTA), parte alta de ladera, media ladera, parte baja de ladera, fondo de valle (FONDO) y llano en ladera, mediante el algoritmo de cálculo desarrollado por Reuter (2003), en ArcInfo Workstation.

c) Características litológicas y edafológicas

Se obtuvieron los siguientes parámetros a partir del IFN3: % de suelo cubierto por rocas (ROCO) en clases (0%, 0-10%, 10-25%, 25-50%, >50%), clase textural (3: arcillosa; 2: franca; 1: arenosa) y pH en clases (1: extremadamente ácido, pH~1; 2: muy fuertemente ácido, pH~2; 3: fuertemente ácido, pH~3-4; 4: moderadamente ácido, pH~5-6; 5: neutro, pH~7; 6: moderadamente básico, pH~8; 7: muy básico, pH~9; 8: extremadamente básico, pH~10).

La clase litológica (LITO_CLASE) se obtuvo a partir del mapa de clases litológicas de interés forestal de Cataluña (Piqué *et al.*, 2011; Conesa *et al.*, 2011), que considera 12 clases: 1 (aguas continentales); 2 (materiales ácidos silíceos); 3 (materiales básicos silíceos); 4

(lutitas); 5 (gres y conglomerados de reacción neutra o ácida); 6 (gres y conglomerados de reacción neutra o básica); 7 (materiales carbonatados competentes); 8 (conglomerados calcáreos masivos)); 9 (materiales carbonatados no competentes, margas); 10 (evaporitas); 11 (materiales aluviales y coluviales); 12 (morrenas, till, diamicticon).

3.4 Análisis estadístico

La normalidad de las variables continuas se comprobó mediante los histogramas de frecuencias y Q-Q plot, considerándolas normales si además la asimetría y el curtosis se situaban entre -1 y 1. Se ajustaron regresiones simples para identificar las relaciones significativas entre el IC y las variables continuas, mientras se realizó un ANOVA para identificar los efectos variables cualitativas. Dado que un tamaño muy desigual de la muestra puede afectar la hipótesis de homogeneidad de la varianza, las clases con menos de 20 casos se excluyeron del ANOVA.

Con las variables que independientemente mostraron efectos significativos sobre el IC en las regresiones simples o en el ANOVA se ajustó una regresión lineal múltiple, transformando previamente las variables cualitativas en *dummies*. Se utilizó la técnica de *forward stepwise*, comprobando la consistencia biológica de los modelos resultantes. Las asunciones de independencia de errores, homocedasticidad, normalidad y presencia de *outliers* se comprobaron mediante examen visual de los histogramas y gráficos de distribución de los residuos estandarizados. La independencia de errores se comprobó mediante el estadístico de Durbin–Watson, que debía situarse entre 1 y 3 y la no multicolinealidad se comprobó mediante el índice de inflación de la varianza, que debía situarse por debajo de 10 para todas las variables.

Finalmente, se utilizó el algoritmo de árbol de decisión *Chi-square automatic interaction detection* (CHAID), para analizar la relación entre el IC y las variables ambientales. El CHAID es un método no paramétrico que permite trabajar con un gran número de variables continuas y categóricas a la vez (Van Diepen & Franses, 2006; Breiman *et al.* 1984). Para cada especie, se generó un árbol de regresión incluyendo en el conjunto de variables elegibles todas las variables continuas y categóricas, independientemente de que mostrasen o no un efecto significativo en las regresiones simples o en el ANOVA. En el presente estudio, se utilizó un nivel de significación del 0,05 en la prueba F y el número máximo de niveles se estableció en cuatro. El número mínimo de casos en un nodo para ser considerado nodo secundario se estableció de acuerdo con el número total de parcelas de cada especie: 50 para *Pinus halepensis* y *Pinus sylvestris*, y el 20 por *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y *Pinus uncinata*. En consecuencia, el número mínimo de casos de un nodo para ser considerado nodo padre era el doble. Para este análisis se utilizó el paquete IBM SPSS software v.19.

En ambos casos, la variable “Orientación” se incluyó en el conjunto inicial de variables elegibles, pero en este caso las ocho clases iniciales se reagruparon en dos grandes clases (las cuatro adyacentes más favorables y las cuatro adyacentes más desfavorables) cuando se identificó un patrón claro de orientaciones mejores y peores. Este es el caso de *Pinus halepensis* (mejor: NE a S; peor: SW a N), *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (mejor: W a NE; peor: E a SW) y *Pinus uncinata* en la regresión (mejor: E a SW; peor: W a NE). En el caso de *Pinus sylvestris*, la orientación no se incluyó en el conjunto de variables elegibles en la regresión dado que en el ANOVA no se encontraron diferencias significativas entre clases y no se identificó un patrón claro de efecto de la exposición.

4. Resultados

4.1. Variables con efecto significativo

Las regresiones simples entre las variables continuas y el IC mostraron que el crecimiento de *Pinus halepensis* y *Pinus sylvestris* está significativamente ($p < 0.05$) relacionado con un elevado número de variables (12 y 13 de un total de 16, respectivamente) mientras que para *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y *Pinus uncinata* solo mostraron relación significativa 4 y 5 variables respectivamente, que además mostraron una R² muy baja. Los coeficientes de determinación fueron en general muy bajos, siendo la relación más fuerte la de la precipitación media anual en el caso de *Pinus halepensis* (R²=0,238). El efecto de las variables cualitativas se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Significación del ANOVA para el efecto de las variables cualitativa sobre el indicador de crecimiento (IC).

Variable	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus uncinata</i>
% de suelo cubierto por rocas (ROCO)	0.000	0.000	0.000	0.000
Clase litológica	0.000	n. s.	0.023	n. s.
Orientación (8 clases)	n. s.	n. s.	n. s.	0.002
Orientación (2 clases)	0.000	0.000	-	0.000
Relieve	0.000	n. s.	n. s.	n. s.
Textura	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
pH	0.000	n. s.	n. s.	n. s.

n.s.: no significativa ($p < 0.05$).

3.2. Regresión múltiple

Las regresiones múltiples ajustadas para las cuatro especies se muestran en la tabla 2. El mejor R² Adj se ha obtenido para *Pinus halepensis*, que además es la especie en que mayor número de variables han sido incluidas en la ecuación. La variable “% de superficie cubierta por rocas” (al menos uno de sus *dummies*) fue seleccionada en las cuatro ecuaciones. Una baja superficie cubierta por rocas (0 a 25%) muestra un efecto positivo para *Pinus halepensis* y *Pinus sylvestris*, mientras un alto % de superficie cubierta por rocas muestra un efecto negativo en *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (>25%) y *Pinus uncinata* (>50%).

Tabla 2. Regresiones lineales entre el índice de Crecimiento (IC) y las variables ambientales para las cuatro especies de *Pinus* estudiadas.

	Regresión	Adj R ²	sig.	SEE
<i>Pinus halepensis</i>	$IC = -0.8160 - 0.0326 TMMIN_AN + 0.0011 PREC_AN + 0.0046 PREC_AU - 0.0056 PREC_WI + 0.1669 ROCO\ 0\% + 0.0688 ROCO < 25\% + 0.2189 FONDO - 0.0656 CRESTA + 0.0977 LITO_CLASE\ 2 - 0.1279 LITO_CLASE\ 8 + 0.1446 LITO_CLASE\ 11$	0.3115	>0.0000	0.3134
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	$IC = 1.708 - 0.0922 TMMAX_JUL - 0.0609 TM_JUL - 0.3234 ROCO > 50\% - 0.1667 ROCO\ 25-50\% - 0.0003 RAD_AN$	0.1035	>0.0000	0.3024
<i>Pinus sylvestris</i>	$IC = 1.6271 - 0.0641 TMMAX_JUL + 0.0006 PREC_SU + 0.1097 ROCO\ 0\% + 0.0736 ROCO < 25\% - 0.0002 ALTITUD$	0.0829	>0.0000	0.3054
<i>Pinus uncinata</i>	$IC = 0.3322 - 0.1614 ROCKS > 50\% + 0.1129 ORIENTACION\ 67.5^\circ - 247.5^\circ - 0.0002 ALTITUD$	0.1078	>0.0000	0.2237

Todas las variables explicativas son significativas ($p < 0.05$) y los modelos son significativos ($p < 0.001$). Adj R²: R² ajustada; SEE: Error Estándar de la Estimación. Las unidades y acrónimos de las variables ambientales corresponden a los citados en el apartado 3.3 “Variables ambientales”.

3.3 CHAID

En el análisis del CHAID se utilizó el conjunto completo de variables (continuas y categóricas). Los resultados de este análisis para las cuatro especies consideradas se muestran en las Figuras 1 a 4). La proporción de varianza explicada por el modelo resultó del 36% para *Pinus halepensis*, del 17% para *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, del 13% para *Pinus sylvestris* y del 18% para *Pinus uncinata*.

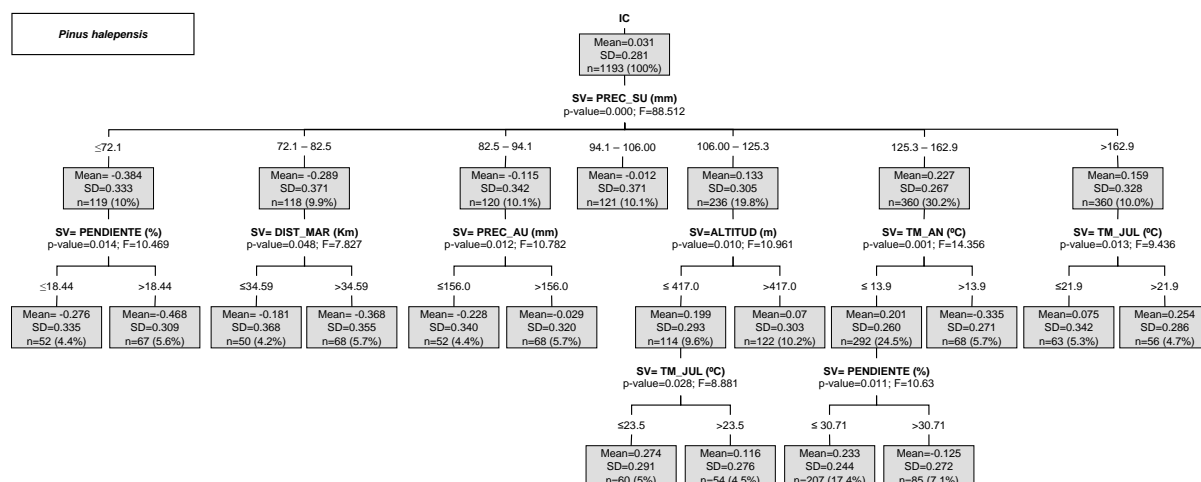


Figura 1. Árbol de clasificación obtenido para *Pinus halepensis*. (IC: índice de crecimiento; SV: Split variable (Variable discriminante del nodo); Mean: media; n: número de parcelas. Las unidades y acrónimos de las variables ambientales corresponden a los citados en el apartado 3.3 “Variables ambientales”).

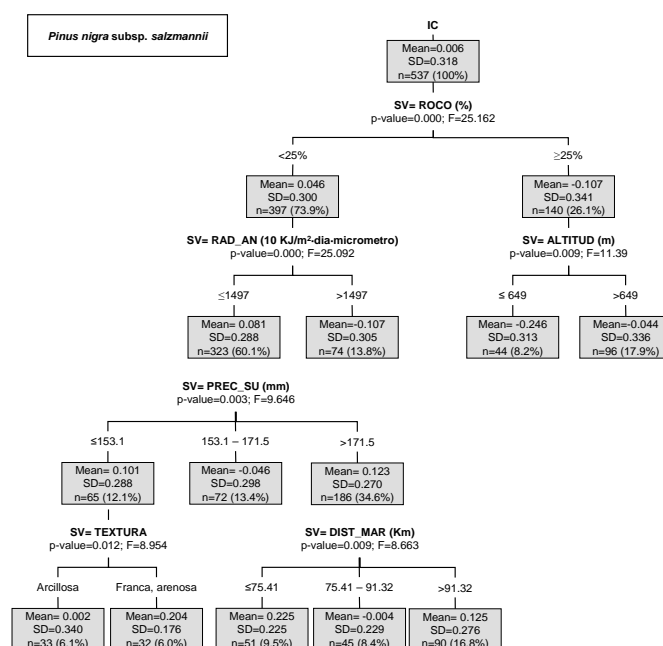


Figura 2. Árbol de clasificación obtenido para *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. (IC: índice de crecimiento; SV: Split variable (Variable discriminante del nodo); Mean: media; n: número de parcelas. Las unidades y acrónimos de las variables ambientales corresponden a los citados en el apartado 3.3 “Variables ambientales”).

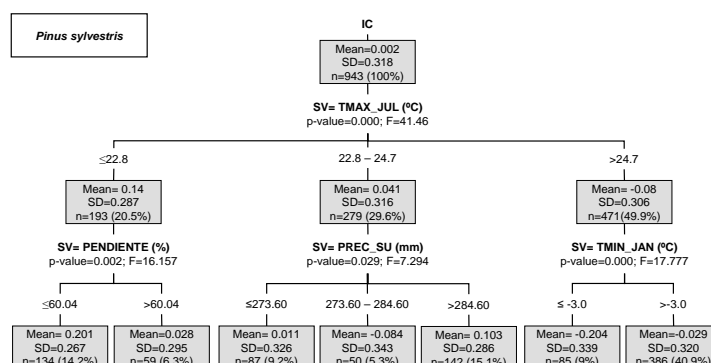


Figura 3. Árbol de clasificación obtenido para *Pinus sylvestris*. (IC: índice de crecimiento; SV: Split variable (Variable discriminante del nodo); Mean: media; n: número de parcelas. Las unidades y acrónimos de las variables ambientales corresponden a los citados en el apartado 3.3 “Variables ambientales”).

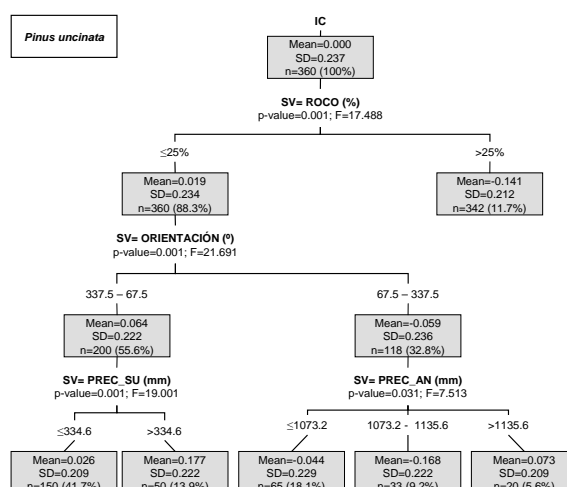


Figura 4. Árbol de clasificación obtenido para *Pinus uncinata*. (IC: índice de crecimiento; SV: Split variable (Variable discriminante del nodo); Mean: media; n: número de parcelas. Las unidades y acrónimos de las variables ambientales corresponden a los citados en el apartado 3.3 “Variables ambientales”).

5. Discusión

5.1. Principales variables ambientales que afectan al crecimiento

Los resultados subrayan la importancia de la variable “% de superficie cubierta por rocas” para las cuatro especies estudiadas, indicando claramente que un bajo recubrimiento de roca determina un mayor crecimiento. Para todas las especies esta variable mostró un efecto significativo en el ANOVA y en la regresión múltiple fue seleccionada en el modelo en todos los casos. Finalmente, en el CHAID esta variable fue seleccionada como primer predictor para *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y *Pinus uncinata*. Esta variable representa un *proxy* del volumen de suelo disponible y, por tanto, se encuentra fuertemente relacionada con la capacidad de retención de agua disponible (CRAD). Este factor es de especial importancia en ambientes mediterráneos, en los cuales gran parte de la precipitación se da dentro del período de reposo vegetativo de las especies vegetales y también en medios más templados, donde el agua almacenada en el suelo puede reducir los efectos negativos de las sequías severas.

Otras variables importantes que afectan al crecimiento de las cuatro especies de *Pinus* en el área de estudio son la precipitación (tanto anual como durante el período vegetativo) y las temperaturas (altas y bajas). Precipitación y temperatura informan sobre el balance

potencial de agua en cada estación durante el periodo de crecimiento. Los efectos de las restantes variables estudiadas (e. g. continentalidad, litología, orientación o relieve) son más específicos de cada especie e incluso algunos de ellos, como las variables edáficas pH o textura, parecen tener un efecto muy limitado.

5.2. Efecto de las variables ambientales sobre las diferentes especies

5.2.1 *Pinus halepensis*

Se trata de la especie donde las variables ambientales afectan más sensiblemente el crecimiento, lo que conjuntamente con el alto número de variables con efecto significativo indican un fuerte carácter plástico en la zona de estudio. La precipitación (tanto anual como durante el período vegetativo), el % de superficie cubierta por rocas (reflejo de la CRAD) y el relieve son las variables más importantes. Estos resultados indican que la disponibilidad de agua (combinación de precipitación, capacidad de retención del suelo y posición fisiográfica) es el factor clave que afecta el crecimiento de esta especie en el área de estudio, hecho consistente con otros estudios sobre esta especie en el E de la Península Ibérica (Olarieta *et al.*, 2000; Ferrio *et al.*, 2003; Olarieta *et al.*, 2004; Vicente-Serrano *et al.*, 2010). La litología, aunque en menor medida es también importante para esta especie, tal como apuntó Schiller (1982).

5.2.2 *Pinus nigra* subsp. *nigra*

El crecimiento de esta especie ha mostrado una relación muy débil con las variables climáticas. Para esta especie, la disponibilidad de agua en el suelo a escala local (bajo % de rocosidad y orientaciones de umbría) es el factor más determinante del crecimiento. Este hecho se alinea con los resultados de Elena & Sánchez-Palomares (1991) y Gandullo & Sánchez Palomares (1994) en el Prepirineo donde las variables físicas del suelo (directamente relacionadas con la capacidad de retención de agua) resultaron ser las más relacionadas con el crecimiento. Esta especie en ambientes mediterráneos se considera extremadamente sensible a la sequía (Martin-Benito *et al.* 2008; Linares & Tíscar, 2010) y el crecimiento se ha relacionado con la precipitación previa al período vegetativo (del otoño anterior al mes de mayo) (Martin-Benito *et al.* 2008). Así pues, el rol del suelo como acumulador de humedad y estabilizador de su disponibilidad sería crucial para el crecimiento de esta especie. Del mismo modo, el efecto positivo de las orientaciones de umbría puede atribuirse a la menor evapotranspiración real de las mismas por la menor insolación. Esta preferencia por las umbrías diferencia a *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* de *Pinus halepensis*, donde las orientaciones de solana muestran mayor crecimiento y de *Pinus uncinata*, donde las solanas son favorables, especialmente si son lluviosas.

5.2.3 *Pinus sylvestris*

Las elevadas temperaturas (con efecto negativo) y las precipitaciones estivales (con efecto positivo), son las variables más relacionadas con el crecimiento de esta especie. El efecto negativo de las temperaturas altas se pone claramente de manifiesto en la regresión múltiple y el CHAID (primera variable discriminante). La precipitación durante el período vegetativo ha sido identificada como un factor clave del crecimiento de esta especie en distintos ambientes biogeográficos, y especialmente en ambientes mediterráneos Bogino *et al.* (2009).

La disponibilidad de suelo, indicada por el % de recubrimiento de rocas, es también importante para esta especie, como sugiere la regresión múltiple. Sin embargo, a diferencia de

Pinus uncinata y *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, que presentan una distribución altitudinal inferior y superior, esta variable no se ha seleccionado en el CHAID. Es posible que este factor sea más importante en el área prepirenaica y submediterránea (como señala Olarieta *et al.*, 2001) y menos en el área pirenaica, lo que diluiría su efecto.

Los resultados conjuntos para esta especie, y particularmente el pobre poder predictivo de la regresión múltiple y el CHAID sugieren que los análisis para esta especie deben abordarse a escalas geográficas menores, como subregión biogeográfica o macizo, dado el amplio gradiente ecológico de la distribución de la especie y su elevada plasticidad.

5.2.4 *Pinus uncinata*

Los resultados señalan que el crecimiento se relaciona positivamente con la disponibilidad de suelo y temperaturas mínimas no demasiado bajas, y negativamente con la altitud. El efecto negativo de las temperaturas bajas extremas coincide con lo señalado por Schueller & Rolland (1995). Por otra parte, el hecho de que esta especie se sitúe en estaciones de alta montaña, con pluviometría elevada reduce el efecto de este factor sobre el crecimiento. Sin embargo, la precipitación se incluye en el CHAID (3^{er} nivel) y la disponibilidad de suelo juega un importante papel en esta especie, sugiriendo que la disponibilidad de agua también es un factor relevante para esta especie. Las altas temperaturas no se han hallado relacionadas con el crecimiento, a pesar de que en algunos estudios se apunta a que inciden negativamente (Gutierrez, 1991) o limitan la distribución de la especie (Mezquida *et al.*, 2010).

El crecimiento se ve favorecido en las orientaciones de solana (regresión múltiple), especialmente cuando se da una alta pluviometría (CHAID). El mayor crecimiento en orientaciones de umbría estricta que sugiere el CHAID coincide con lo expuesto por Calama *et al.* (2004) y González-Molina (2008) sobre la mejor calidad de estas localizaciones para la producción maderera de esta especie.

6. Conclusiones

La disponibilidad hídrica destaca como la variable ambiental más fuertemente relacionada con el crecimiento de las cuatro especies, aspecto lógico dada la componente mediterránea del área estudiada. No obstante, mientras para *Pinus halepensis* (especialmente), *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* la pluviometría es un factor relevante, para *Pinus nigra* el sustrato es el factor más determinante de la disponibilidad hídrica. Las temperaturas elevadas no son favorables al crecimiento para *Pinus halepensis* y especialmente para *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*. *Pinus uncinata*, por su parte, se ve favorecido por unas temperaturas mínimas poco bajas, de acuerdo a su localización en el límite altitudinal del arbolado.

El uso de un indicador basado en el crecimiento diametral ha permitido realizar un análisis del efecto de las variables ambientales con datos de un gran número de parcelas como es el IFN, incluyendo parcelas donde el uso del SI no sería posible (no regulares, desconocimiento de la edad, árboles dominantes extraídos, etc.). A pesar del bajo ajuste encontrado en muchos casos, atribuibles a la metodología de cálculo del indicador a partir de un modelo de incremento diametral que por sí mismo explica un limitado porcentaje de varianza, los resultados son lógicos y consistentes con otros estudios parciales existentes. En este contexto, la técnica del CHAID resulta útil para entender mejor la influencia de las distintas variables ambientales estudiadas y esbozar más consistentemente el mapa de relaciones entre crecimiento y variables ambientales.

Los resultados proporcionan información útil para decisiones a nivel regional y para la adaptación al cambio global. Mediante el uso de variables ambientales de fácil identificación o disponibilidad es posible conocer la idoneidad del territorio para las diferentes especies en cuanto a su adaptación y capacidad productiva y realizar recomendaciones de gestión para su adaptación al cambio global (promoviendo o penalizando determinadas especies según zonas; de acuerdo con el rango de posibles escenarios climáticos considerado a día de hoy). Además, la información obtenida es de utilidad para los gestores de cara a la toma de decisiones a escala de rodal.

7. Agradecimientos

Al Centre de la Propietat Forestal (Generalitat de Catalunya) y a J. A. Conesa, L. Coll, S. Martín, A. Améztegui y Mario Beltrán.

8. Bibliografía

BOGINO, S. M.; BRAVO, F. 2008. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 65: 506.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J. H.; OLSHEN, R. A.; STONE, C. J. 1984. Classification and regression trees. Wadsworth International Group, Belmont, California.

CALAMA, R.; DEL RÍO, M.; COQUILLAS, V.; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G. 2004. Modelos de calidad de estación y de perfil de fuste para masas de *Pinus uncinata* Ram. en el Pirineo español. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For. Fuera de serie*, 176-190

CONESA, J. A.; VERICAT, P.; PIQUÉ, M.; SAURA, S.; TORRAS, O. 2011. Mapa de classes litològiques d'importància forestal a partir del Mapa geològic de Catalunya 1:50.000. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.

DGCN, 2001. Tercer Inventario Forestal Nacional (1997–2006) Cataluña. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

ELENA, R.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O. 1991. Los pinares españoles de *Pinus nigra* Arn.: Síntesis ecológica. Colección Monografías INIA nº 81. MAPA-INIA. 110 p. Madrid.

FERRIO, J. P., FLORIT, A., VEGA, A., SERRANO, L., VOLTAS, J. 2003. D13C and tree-ring width reflect different drought responses in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis*. *Oecologia*, 442: 512-518

GANDULLO, J. M.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación – ICONA. 188 p. Madrid.

GONZÁLEZ-MOLINA, J. M. 2008. Selvicultura de *Pinus uncinata* Mill. In: Serrada R.; Montero G.; Reque J. A. Compendio de selvicultura aplicada en España. pp: 535-546. INIA. Madrid, Spain.

GUTIÉRREZ, E. 1991. Climate-tree growth relationships for *Pinus uncinata* Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Oecologica*, 12(2): 213-225

ICONA, 1993. Segundo Inventario Forestal Nacional (1986–1995) Cataluña. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA, 2006. Base topogràfica de Catalunya 1:5000

KAHLE, H. P.; SPIECKER, H. 1996. Adaptability of radial growth of Norway spruce to climate variations: results of a site specific dendroecological study in high elevations of the Black Forest (Germany). Radiocarbon 785-801

LINARES, J. C.; TÍSCAR, P. A. 2010. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. Tree Physiology, 30(7): 795-806

MÄKINEN, H. 1998. The suitability of height and radial increment variation in *Pinus sylvestris* (L.) for expressing environmental signals. Forest Ecology and Management 112: 191-197

MARTÍN-BENITO, D.; CHERUBINI, P.; DEL RÍO, M.; CAÑELLAS, I. 2008. Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. Trees 22: 263–273

MEZQUIDA E. T.; RUBIO A.; SÁNCHEZ-PALOMARES O. 2010. Evaluation of the potential index model to predict habitat suitability of forest species: the potential distribution of mountain pine (*Pinus uncinata*) in the Iberian peninsula. Eur J Forest Res, 129: 133–140

NINYEROLA, M., PONS, X., ROURE, J. M. 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. Int. J. Climatol., 20: 1823-841.

OLARIETA, J. R.; USÓN, A.; RODRÍGUEZ, R.; ROSA, M.; BLANCO, R.; ANTÚNEZ, M. 2000. Land requirements for *Pinus halepensis* Mill. growth in a plantation in Huesca, Spain. Soil Use and Management, 16: 88-92

OLARIETA J. R.; MOLINS J.; RODRÍGUEZ R.; BLANCO R.; ANTÚNEZ M. 2001. Aproximación a los requerimientos del territorio para el crecimiento de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) en la Sierra de Odén. Edafología, 8-2: 13-20

OLARIETA, J. R.; SEMPERE, S.; RODRÍGUEZ-OCHOA, R.; USÓN, A. 2004. Aproximación a los requisitos del territorio para el crecimiento de *Pinus halepensis* en la Serra de Montsant (Tarragona). Cuad. Soc. Esp. Cienc. For., 20: 99-104

PENNOCK D. J.; ZEBARTH B. J.; DE JONG E. 1987. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. Geoderma, 40: 297-315

PIQUÉ M.; VERICAT P.; CERVERA T.; BAIGES T.; FARRIOL R. 2011. Tipologies forestals arbrades. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

PONS X. 1996. Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. In: Juaristi J.; Moro I. (Eds.), Modelos y Sistemas de Información en Geografía. Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco, y Grupo de Métodos Cuantitativos de la Asociación de Geógrafos Españoles, Vitoria-Gasteiz, pp. 87–97

REUTER H I. 2003; Analyzing digital elevation models using relief analysis within ArcInfo. Department of soil landscape research. Centre for agricultural landscape and soil use research. Institute of soil landscape research. ZALF Müncheberg. Germany.

SCHILLER, G. 1982. Significance of bedrock as a site factor for Aleppo pine. *Forest Ecology and Management*, 4 (3): 213–223

SCHRÖDER J.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R.; VEGA-ALONSO G. 2002. An age-independent basal area increment model for maritime pine trees in northwestern Spain, *Forest Ecology and Management*. 157: 55-64

TRASOBARES A.; PUKKALA T. 2004. Using past growth to improve individual-tree diameter growth models for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. *Ann. For. Sci.*, 61(5): 409-417

TRASOBARES A.; PUKKALA T.; MIINA J. 2004. Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Ann. For. Sci.*, 61(1): 9-24

VAN DIEPEN M.; FRANSES H.P. 2006. Evaluating chi-squared automatic interaction detection. *Inf. Syst.*, 31: 814–831

VERICAT, P., PIQUÉ, M., TRASOBARES, A. 2009. Tipificación de la calidad de estación en base a variables ecológicas para el pino silvestre en Cataluña. Actas del V Congreso Forestal Español. SECF-Junta de Castilla y León. [5CFE01-051]

VICENTE-SERRANO S. M.; LASANTA T.; GRACIA C. 2010. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 614–628