

Modelos de calidad de estación y de perfil de fuste para masas de *Pinus uncinata* Ram. en el Pirineo español

R. Calama, M. del Río*, V. Coquillas, I. Cañellas y G. Montero

CIFOR-INIA. Ctra. A Coruña, km 7,5. 28040 Madrid. España

Resumen

En este trabajo se presenta información sobre el crecimiento y producción de las masas de *Pinus uncinata* en España. Inicialmente se realiza una caracterización selvícola-dasométrica de las masas de esta especie mediante los datos del Segundo Inventario Forestal Nacional. Se diferencian masas mixtas y monoespecíficas y se clasifican según rangos de espesura definidos a partir del índice de densidad de Reineke. Posteriormente se desarrolla un modelo de calidad de estación a partir de 84 análisis de tronco procedentes de árboles dominantes de masas de pino negro en Pirineos. La función seleccionada es la ecuación en diferencias de Mc-Dill y Amateis (1992), que verifica las propiedades de polimorfismo, reciprocidad e invarianza respecto a la edad típica. Se definen cuatro curvas de calidad de estación con índices de sitio de 8, 12, 16 y 20 m de altura dominante a los 100 años. Por último, utilizando 191 árboles tipo de 13 parcelas permanentes se ajusta una ecuación de perfil de tronco. Entre 10 funciones ensayadas se elige el modelo de Kozak (1988). A partir del modelo ajustado se construye una tabla de cubicación de árbol individual de doble entrada que ofrece el volumen maderable total y de sierra en pie.

Palabras clave: *Pinus uncinata*, caracterización dasométrica, calidad de estación, ecuación de perfil, producción.

Abstract

Pinus uncinata Ram.: dasometric characterization, site index curves and taper equation

This study presents information about growth and yield of *Pinus uncinata* in Spain. Firstly, using data from the Second National Forest Inventory a silvicultural and dasometric characterization of stands is made. *Pinus uncinata* stands are classified between mixed and pure stands and by density ranges through the Reineke's stand density index. Secondly, a site index model is developed using 84 stem analysis from dominant trees of *Pinus uncinata* stands in Pyrenees. The selected function is the difference equation of Mc-Dill y Amateis (1992), which is polymorphic, reciprocal and base-age invariant. Four site quality curves are defined with site index of 8, 12, 16 and 20 m of dominant height at the age of 100 years. Finally, a stem taper function is fitted using 191 sample trees from 13 permanent plots. Among 10 tested functions the model of Kozak (1988) is selected. This adjusted model is used to build an individual volume table which gives the total and saw timber per tree.

Key words: *Pinus uncinata*, dasometric characterization, site index, taper equation, yield.

Introducción

A pesar de la poca superficie que ocupa en la península Ibérica (aproximadamente 53.000 ha), *Pinus uncinata* Ram. es una especie de gran interés debido a su carácter singular y al importante papel ecológico-protector de sus masas en la cordillera pirenaica, siendo la especie forestal más representativa de la alta montaña eurosiberiana. Se localiza de forma natural en los Alpes occidentales y a lo largo de los Pirineos, llegan-

do por el límite sur de su distribución hasta la sierras de Gúdar y Cebollera. La mayor representación de la especie en España se sitúa en la provincia de Lérida, donde se estima que hay unas 30.000 ha. En Huesca y Navarra ocupa cerca de 10.000 ha en masas discontinuas, similar superficie a la que ocupa en Gerona, fundamentalmente en el NO de la provincia. En Barcelona hay unas 3.000 ha que actualmente colonizan los pastizales de altura. En la Sierra de Gúdar (Teruel) y en la sierra Cebollera (Soria) se mezcla con *Pinus sylvestris*, aunque se mantienen algunos rodales puros.

Pinus uncinata es una especie típicamente de montaña, situándose la mayor parte de sus rodales en lade-

* Autor para la correspondencia: delrio@inia.es
Recibido: 17-09-03; Aceptado: 20-01-04.

Tabla 1. Distribución de la superficie ocupada por *Pinus uncinata* en masas puras y mezcladas con *P. sylvestris*, en porcentaje, según pendiente

Gradiente de pendiente (%)	Masas puras	Masas mezcladas
< 3	0,22	0,15
3-12	2,00	0,32
12-20	5,33	2,66
20-35	14,17	17,59
> 35	78,28	79,33

Fuente: DGCONA (1988).

ras con fuertes pendientes (Tabla 1). Su rango altitudinal es de 400-2400 m sobre el nivel del mar, aunque la mayoría de las masas están situadas en cotas superiores a los 1000 m (Tabla 2). Su ausencia en zonas más bajas se debe a la falta de precipitaciones, de nieblas o ambientes húmedos o por exceso de calor estival o continentalidad. En España, los mejores rodales de la especie se sitúan generalmente entre 1.400-1.600 m de latitud en las umbrías y 1.800-2.200 m en las laderas de solana. El límite entre los pisos subalpinos y alpino coincide con la franja en la que el bosque desaparece como consecuencia del clima excesivamente frío.

Las características ecológicas del pino negro corresponden a su carácter de especie microterma y orófila, siendo la más higrofílica de las especies españolas del género *Pinus* (Ruiz de la Torre, 1979), con necesidades de precipitaciones superiores a los 600 mm anuales, parte de las cuales han de ser estivales. La oscilación térmica anual es pequeña, pues, aunque so-

porta grandes fríos, las máximas del verano son bajas, pudiendo calificarse de especie semicontinental. En la zona alpina crece en el límite de la vegetación arbórea y es muy resistente a vientos, nieve, heladas y avalanchas debido a la flexibilidad de sus ramas. Es una especie de semi-luz, pero no tiene requerimientos especiales de naturaleza física o química en el suelo, presentando una gran plasticidad y frugalidad. Crece bien en suelos de naturaleza tanto silíceas como calizas, mostrándose indiferente a la textura. Requiere más frescura en el suelo que el pino silvestre, pudiendo vivir sobre turberas o suelos húmedos más o menos podsolizados, aunque prefiere los suelos no compactos. Coloniza igualmente los medios rupestres, donde introduce directamente las raíces en las grietas de las rocas y puebla así los roquedos casi verticales y calizas carstificadas (CABI, 2000). Asimismo coloniza terrenos desprovistos de vegetación como consecuencia de la erosión por aludes, agua o nieve.

Si bien el pino negro forma masas puras en el ambiente subalpino donde está bien representado, se mezcla en niveles inferiores con especies como el abeto (*Abies alba*), el haya (*Fagus silvatica*) y el pino silvestre (*Pinus sylvestris*). Con este último llega a establecer fuertes relaciones y son comunes los híbridos entre ambas especies. En los enclaves más húmedos aparece mezclado con el abedul (*Betula pubescens*), serbal (*Sorbus aucuparia*) y álamo temblón (*Populus tremula*). Al no resistir la competencia con otras especies arbóreas en estas masas mezcladas aparece ocupando las peores estaciones. Fuera del área ibérica, el pino negro convive frecuentemente con otras coníferas subalpinas, tal y como ocurre en los Alpes, donde se mezcla con el abeto y alerce (CABI, 2000).

En España *P. uncinata* ha sido utilizado en reforestaciones de pequeños rodales en la Sierra de Guadarrama y Sierra Nevada, cuya finalidad principal ha sido la protección de suelos y el control de avalanchas y derrumbamientos. Según los datos de los Anuarios de Estadística Agraria entre 1941 y 1996 se repoblaron en torno a 6.800 ha con pino negro. A esta superficie habría que añadir las posibles repoblaciones realizadas los años en los que no existen datos disponibles en los anuarios, y las casi 9.000 ha repobladas con la especie dentro del programa de reforestación de tierras agrarias (Reglamento 2080/92) durante el periodo 1994/1999. Estas últimas repoblaciones se han efectuado mayoritariamente en Castilla y León, y la mitad de estas plantaciones son mezclas con *Pinus sylvestris*.

Tabla 2. Distribución de la superficie ocupada por *Pinus uncinata* en masas puras y mezcladas con *P. sylvestris*, en porcentaje, a diferentes rangos altitudinales

Altitud (m)	Masas puras	Masas mezcladas
< 400	—	0,05
400-600	0,05	0,17
600-800	0,13	1,47
800-1.000	0,08	5,72
1.000-1.200	0,81	10,22
1.200-1.400	3,20	16,44
1.400-1.600	9,75	23,99
1.600-1.800	31,75	25,19
1.800-2.000	26,25	11,61
> 2.000	27,98	5,14

Fuente: DGCONA (1988).

Sus masas suelen tener bajas espesuras en las cotas elevadas y suelos más pobres, aunque en las mejores calidades de estación forma masas densas con espesura completa. Los aprovechamientos madereros que se han realizado de forma tradicional sobre esta especie han estado limitados por su lento crecimiento (turno de corta superior a 120 años) y la dificultad de realizar dichos aprovechamientos debido a la orografía y escasa accesibilidad de estas masas forestales. La madera es densa y apreciada para la construcción, si bien el pequeño tamaño de sus escuadrías ha limitado su uso a construcciones ligeras y combustible. Los bosques más productivos y, por tanto, con mayor interés en cuanto a su aprovechamiento maderero son los situados en la parte oriental de los Pirineos (provincias de Lérida y Gerona).

En los pinares con densidades bajas el aprovechamiento ganadero de los pastizales de montaña adquiere importancia económica, constituyendo una dificultad importante para la regeneración natural del pinar. A esto hay que unir que en los niveles superiores al piso subalpino, por encima de los 2000 m de altura, esta especie presenta problemas en su regeneración natural debido a las condiciones climáticas adversas (Costa *et al.*, 1997).

Dada la singularidad y las características mencionadas de los pinares de *Pinus uncinata*, los estudios referidos a esta especie son muy escasos, centrándose gran parte de ellos en aspectos botánicos y de estructura y dinámica natural de las masas (Génova, 1986; Neet-Sarqueda *et al.*, 1988; Bosch *et al.*, 1992; Gutiérrez *et al.*, 1998). Existen algunos trabajos relativos a aspectos parciales del crecimiento y producción (Schueller y Rolland, 1994; Camarero *et al.* 1998), pero con excepción de las curvas de calidad de estación y el estudio de crecimiento y producción desarrollados por Pita (1967a, 1967b) y los trabajos sobre selvicultura y productividad de Cantegrel (1983, 1987), casi no existen herramientas que faciliten la gestión y toma de decisión en las masas pirenaicas de pino negro.

Teniendo presente la necesidad de muchas masas del Pirineo de ser intervenidas selvicolamente y con la información experimental de que se dispone en este momento, se considera interesante presentar una caracterización selvícola-dasométrica de estas masas y una clasificación de calidades de estación como punto de partida para iniciar el estudio de la selvicultura a aplicar en diferentes calidades productivas. El estudio de las ecuaciones de perfil de tronco constituye una herramienta para evaluar la capacidad de produc-

ción de madera de sierra de esta especie. Si como parece evidente, hay que comenzar a aplicar cortas, se hace necesario caracterizar y cuantificar los productos que previsiblemente se van a obtener.

Material y Métodos

Caracterización dasométrica

Para caracterizar dasométricamente las masas de pino negro se han utilizado los datos disponibles en el Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2) (ICONA, 1990). De la base de datos del IFN2 se han seleccionado la información correspondiente a las provincias de Barcelona, Gerona, Huesca, Lérida y Navarra.

Con el fin de seleccionar las parcelas del IFN2 en las que aparece *Pinus uncinata* se ha empleado BASIFOR (Río *et al.*, 2002), aplicación informática para el manejo de bases de datos del IFN2. Esta herramienta informática permite seleccionar parcelas según diversos criterios (especie, variables de masa, coordenadas UTM, etc.) y realizar una serie de cálculos utilizando estas parcelas seleccionadas (datos por clase diamétrica, por parcelas, por especie, etc.).

En cada una de las provincias citadas se han elegido aquellas parcelas del IFN2 en las que aparece al menos un pie mayor (diámetro normal superior a 7,5 cm) de *Pinus uncinata*, resultando un total de 905 parcelas. Para su clasificación se han considerado como masas monoespecíficas aquellas parcelas en las que el porcentaje de árboles de pino negro es mayor o igual al 90% y como mixtas el resto (Madrigal, 1994). Dentro de las masas mixtas se ha tomado como especie dominante aquella que ocupa más del 50% del área basimétrica de la parcela.

Tanto las parcelas monoespecíficas como las mixtas se han clasificando atendiendo a la espesura de la masa siguiendo el criterio propuesto por Long (1985) basado en el índice de densidad de Reineke, cuya expresión es:

$$SDI = N \cdot \left(\frac{D_{25}}{D_g} \right)^\beta$$

donde *SDI* es el índice de densidad de Reineke; *N* el número de pies por hectárea, *D*₂₅ el diámetro de referencia, 25 cm; *D*_g el diámetro medio cuadrático en cm; y β la pendiente de la recta de Reineke (1933). Este autor propuso un valor constante de la pendiente para

todas las especies e igual a $-1,605$, aunque posteriormente se ha comprobado que esta pendiente varía entre especies (Zeide, 1985; Bredenkamp y Burkhardt, 1990; Puettmann *et al.*, 1993; Río *et al.*, 2001). En el caso particular de *Pinus uncinata*, al no conocerse el valor de esta pendiente se ha utilizado el propuesto por Reineke.

Basándose en el máximo índice de densidad de Reineke (SDI_{max}) encontrado para una especie, Long (1985) estableció tres rangos de espesura: a) masas con SDI mayor al 60% del SDI_{max} encontrado, límite inferior de espesura en el que comienza el autoaclareo o mortalidad natural por competencia; b) masas con SDI entre el 35% y el 60% del SDI_{max} encontrado, reflejando masas con espesura completa y sin autoaclareo; y c) masas con SDI inferior al 35% del SDI_{max} encontrado, límite inferior de la completa ocupación de la estación.

Una vez clasificadas las parcelas se ha procedido a realizar una caracterización dasométrica de las masas monoespecíficas, de las mixtas, y de las tres espesuras definidas para el caso de las masas monoespecíficas. Se ha calculado la media y los valores mínimo y máximo de las principales variables de masa: N° pies/ha, número de pies por hectárea; Dg , diámetro medio cuadrático en cm; Do , diámetro dominante en cm; Hm , altura media en m; Ho , altura dominante en m; G , área basimétrica en m^2/ha ; V , volumen con corteza en m^3/ha ; SDI , índice de densidad de Reineke.

Modelo de calidad de estación

Análisis de troncos

En el presente trabajo se han utilizado 84 análisis de troncos procedentes de individuos dominantes de masas de *Pinus uncinata*. De ellos, 38 corresponden a árboles apeados y analizados en 1966, seleccionados en 13 parcelas permanentes del departamento de silvicultura del CIFOR- INIA en masas de *P. uncinata* en las provincias de Lérida y Huesca en los Pirineos centrales. Los 46 árboles restantes fueron apeados y analizados en la comarca de La Cerdanya (provincias de Lérida y Gerona) durante el año 2002, en el marco del presente estudio.

En ambas ocasiones, los árboles se seleccionaron en masas adultas, regulares y de espesura completa. Con el fin de garantizar la validez de la muestra en primer lugar se seleccionaron rodales de *P. uncinata* que

Tabla 3. Características de la muestra de análisis de tronco de *Pinus uncinata* utilizada en el ajuste del modelo de calidad de estación

N.º árboles	N.º rodajas	Altura mín.-máx. (m)	Edad mín.-máx. (años)
84	784	7,2-22,2	48-187

cubrieran el mayor rango posible de calidades de estación presentes en el territorio. Dentro de estas masas, el criterio de selección de los individuos fue el de pertenencia al estrato dominante. La tabla 3 recoge un resumen con las características principales de la muestra de árboles dominantes.

Los árboles fueron apeados procurando dejar la menor altura de tocón posible. El tronco del árbol fue dividido en secciones separadas cada 2,5 m (muestra 1966) o cada 1,25 m (muestra 2002) medidos a lo largo del fuste. A continuación se extrajeron discos a la altura del tocón y en cada una de las secciones. Los discos se pulieron y se midió el número de anillos de crecimiento anual de cada uno de ellos. La secuencia del conteo de anillos de cada disco permite la reconstrucción en el tiempo del crecimiento en altura de estos árboles dominantes (figura 1).

Muestra de validación

Como muestra de validación para el modelo de crecimiento en altura dominante se ha utilizado el valor de la altura dominante correspondiente a los inventarios de 1966 y 1971 de las 13 parcelas permanentes del

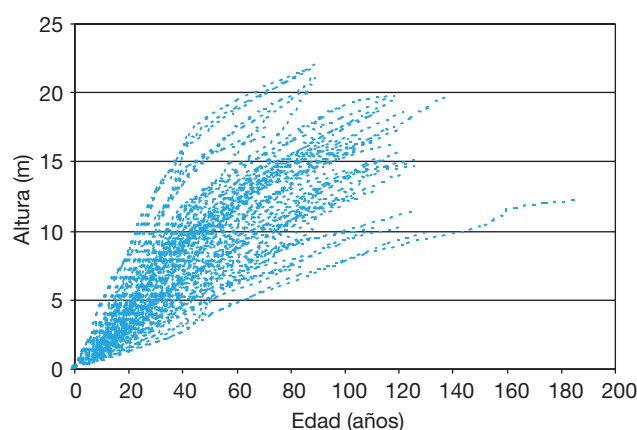


Figura 1. Análisis de tronco utilizados en el ajuste del modelo de calidad de estación para *Pinus uncinata*.

Tabla 4. Características de la muestra de alturas dominantes-edad de las parcelas permanentes de *Pinus uncinata* del CIFOR-INIA utilizada en la validación del modelo de calidad de estación

N.º parcelas	N.º mediciones	Altura mín.-máx. (m)	Edad mín.-máx. (años)
13	26	8,5-18,9	48-122

CIFOR-INIA instaladas en masas de *Pinus uncinata*. En la tabla 4 se resume las características de estos datos de validación.

Ajuste

A partir de los datos procedentes de los análisis de troncos se han ajustado modelos de crecimiento en altura dominante, que permitirán el desarrollo posterior de modelos de calidad de estación. De entre las diferentes técnicas desarrolladas para la construcción de modelos de calidad de estación se utiliza el método de ecuación en diferencias (Bailey y Clutter, 1974). Este método permite estimar la altura dominante de un rodal a una edad indicada, a partir del conocimiento de la altura dominante de ese rodal a otra edad cualquiera. Para ello se ajustan ecuaciones del tipo:

$$Ho_2 = f(Ho_1, T_1, T_2) + e$$

donde Ho_i indica la altura dominante a una edad T_i , y e es un término residual del error. Hoy en día se dispone de un amplio elenco de ecuaciones de este tipo (Cao, 1993; Huang, 1997), desarrolladas, por diferenciación y expansión de parámetros, a partir de ecuaciones clásicas de crecimiento tales como la de Richards (1959), Korf (1939) o Schumacher (1939).

En el presente trabajo se han analizado y comparado cinco ecuaciones en diferencias distintas (tabla 5). En el ajuste de estas ecuaciones se utilizaron todos los posibles pares edad-altura dominante generados en cada uno de los análisis de tronco de la muestra (Goelz y Burk, 1992; Huang, 1997).

Con el fin de anular el posible efecto de la correlación existente entre mediciones procedentes del mismo árbol se introdujo la corrección autoregresiva del error propuesta por Goelz y Burk (1992). Los ajustes se realizaron en dos fases utilizando el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS.

En la comparación entre modelos se han considerado los siguientes aspectos: mejor ajuste a la mues-

Tabla 5. Ecuaciones en diferencias seleccionadas para el ajuste del modelo de calidad de estación para *Pinus uncinata*

Referencia	Función
Richards (1959)	$H_2 = H_1 \cdot \{(1 - \exp(a \cdot T_2)) / (1 - \exp(a \cdot T_1))\}^b$
Goelz-Burk (1992)	$H_2 = H_1 \cdot \{(1 - \exp(k \cdot T_2)) / (1 - \exp(k \cdot T_1))\}^d$; $k = a \cdot (H_1/T_1)^b \cdot T_1^c$
Schumacher (1939)	$H_2 = H_1 \cdot \exp\{a \cdot (1/T_2 - 1/T_1)\}$
Bailey-Clutter (1974)	$H_2 = \exp\{a + (\ln(H_1) - a) \cdot (T_2/T_1)^b\}$
McDill-Amateis (1992)	$H_2 = a / \{1 - [(1 - a/H_1) \cdot (T_1/T_2)^b]\}$

H_i : altura dominante a la edad T_i . a , b y c : parámetros.

tra original (menor error medio cuadrático y mayor eficiencia predictiva); nivel de significación de los parámetros; valor medio del error y nivel de significación del mismo; eficiencia predictiva y valor medio del error en la muestra de validación; y comportamiento acorde con la realidad biológica.

Modelo de perfil de tronco

Árboles tipo

En cada una de las 13 parcelas permanentes instaladas por el CIFOR-INIA en 1966 en masas de *Pinus uncinata* se seleccionaron de forma aleatoria 15 árboles tipo. La selección de estos pies tenía como objetivo el realizar las mediciones que permitieran el ajuste y desarrollo de tarifas de cubicación para la especie. En estos pies se midió el diámetro sobre corteza y el espesor de corteza en diferentes puntos a lo largo del fuste. Las medidas se tomaron a la altura del tocón, a 0,50 m de altura y, a partir de este punto, cada metro a lo largo del tronco hasta una altura de 10 m, y, a continuación, cada 2 m hasta la altura medible del fuste (diámetro en punta delgada igual a 7 cm). Una particularidad del método empleado en estas parcelas permanentes radica en el hecho de que no se requería el apeo del árbol tipo, ya que eran los operarios los que trepaban por el tronco con escaleras forestales tipo Nancy y tomaban las mediciones. Esto permitía repetir las mediciones en los sucesivos inventarios.

Para *Pinus uncinata* se realizaron mediciones de árboles tipo en los inventarios de los años 1966 y 1971. En el presente trabajo se utiliza la muestra de 1971, ya que es la única en la que se dispone del dato de diámetro a la altura del tocón. La tabla 6 presenta las ca-

Tabla 6. Características de la muestra de árboles tipo de las parcelas permanentes de *Pinus uncinata* del CIFOR-INIA utilizada en el ajuste de la ecuación de perfil

N.º árboles	N.º mediciones diámetro- altura	Diámetro mín.-máx. (cm)	Altura mín.-máx. (ms)
191	2.392	7,9-35,6	6,30-21,00

racterísticas principales de la muestra disponible de árboles tipo de *Pinus uncinata*. No se dispone de una muestra de datos independientes para poder validar la función de perfil.

Ajuste

Los 2.392 pares diámetro-altura medidos en los fustes de los 191 árboles tipo permiten desarrollar ecuaciones de perfil, funciones de forma de fuste que relacionan la altura y diámetro de un punto del árbol, pudiendo incluir como explicativas variables tanto del árbol como de la masa. En el presente trabajo se han analizado modelos que únicamente incluían como variables explicativas las dimensiones del árbol: diámetro normal y altura total.

De entre las múltiples ecuaciones de perfil existentes en la actualidad (Novo, 2001), se han comparado las diez funciones recogidas en la tabla 7. Las funcio-

Tabla 7. Funciones de perfil seleccionadas para el ajuste y comparación del modelo de perfil de tronco para *Pinus uncinata*

N	Referencia	Expresión
1	Bruce (1968)	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = \left(\frac{b_1 X^{1.5}}{10}\right) + \left(\frac{b_2 (X^{1.5} - X^3) \cdot D}{10^2}\right) + \left(\frac{b_3 (X^{1.5} - X^3) \cdot H}{10^3}\right) + \left(\frac{b_4 (X^{1.5} - X^{32}) \cdot H \cdot D}{10^5}\right) + \left(\frac{b_5 (X^{1.5} - X^{32}) \cdot H^{0.5}}{10^3}\right) + \left(\frac{b_6 (X^{1.5} - X^{40}) \cdot H^2}{10^6}\right)$
2	Kozak (1969)	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = b_1 \cdot (T - 1) + b_2 \cdot (T^2 - 1)$
3	Amidon (1984)	$\left(\frac{d}{D}\right) = b_1 \cdot \left(\frac{H - h}{H - 1.30}\right) + b_2 \cdot \left(\frac{(H^2 - h^2) \cdot (h - 1.30)}{D \cdot H^2}\right)$
4	Jiménez (1994)	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 + b_3 \cdot T^3 + b_4 \cdot T^4$
5	Demaerschalk (1972)	$\log(d) = b_1 + b_2 \cdot \log(D) + b_3 \cdot \log(H - h) + b_4 \cdot \log(H)$
6	Kozak (1988)	$\log(d) = b_0 + b_1 \cdot \log(D) + b_2 \cdot \log(Z) \cdot T^2 + b_3 \cdot \log(Z) \cdot \log(T + 0.001) + b_4 \cdot \log(Z) \cdot \sqrt{T} + b_5 \cdot \log(Z) \cdot \left(\frac{D}{H}\right)$
7	Thomas (1991)	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = b_1 \cdot (T - 1) + b_2 \cdot \text{sen}(c \cdot \pi \cdot T) + b_3 \cdot \text{cotg}\left(\frac{\pi T}{2}\right)$
8	Parresol (1987)	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = Y^2 (b_1 + b_2 \cdot Y) + (Y - b_5)^2 [b_3 + b_4 (Y + 2b_5)] I$
9	Max-Burkhardt (1976)	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = b_1 (T - 1) + b_2 (T^2 - 1) + b_3 (b_5 - T)^2 I_1 + b_4 (b_6 - T)^2 I_2$
10	Riemer (1995)	$d = b_1 DK_1 + \left(\frac{D}{2} - b_1 D\right) (1 - K_2) + e^{-b_2 h} \left(\frac{D}{2} - b_1 D\right) e^{1.3b_2} K_2 - e^{b_3 h} b_1 DK_1 e^{-b_3 h}$

d: diámetro de sección. h: altura de sección. D: diámetro normal del árbol. H: altura total del árbol. T: h/H; X=(H-h)/(H-1.3).

$Z = \frac{1 - \sqrt{T}}{1 - \sqrt{0.25}}$; $Y = \frac{H - h}{H}$; $K_1 = \frac{1}{1 - e^{b_3(1.3 - H)}}$; $K_2 = \frac{1}{1 - e^{b_2(1.3 - H)}}$; I_1 : variables ficticias que permiten definir modelos para distintas partes del tronco. $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ y b_6 : parámetros.

nes seleccionadas pertenecen a los grupos de modelos polinómicos simples, polinómicos segmentados, potenciales, exponenciales, de exponente variable y trigonométricos. Excepto los modelos segmentados (modelos 8 y 9) y la ecuación no lineal de Riemer (modelo 10) (Riemer *et al.*, 1995), el resto de modelos presenta forma lineal o fácilmente linealizable mediante transformación logarítmica. El ajuste de los modelos lineales o linealizables se realizó mediante el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT, mientras que para el resto de modelos se empleó el procedimiento NLIN del mismo paquete, utilizando el método iterativo DUD (don't use derivatives).

En los modelos seleccionados la variable dependiente no es siempre la misma, por lo que los estadísticos de bondad de ajuste no pueden ser utilizados como criterio de comparación. La variable dependiente de cada uno de los modelos se transforma en la variable diámetro de sección. Una vez definida una variable dependiente común, los modelos se comparan utilizando los siguientes criterios: valor medio del error y nivel de significación; valor medio del error absoluto; valor medio del error relativo (error/valor predicho expresado en %); eficiencia ajustada del modelo; error medio cuadrático; valor del error medio y de la raíz del error medio cuadrático en la estimación del diámetro de la sección en intervalos del 10% de altura relativa.

Resultados y Discusión

Caracterización dasométrica de las masas de pino negro en Pirineos

En la tabla 8 se presenta el porcentaje de masas monoespecíficas y mixtas en las que aparece *Pinus uncinata* por provincia, calculado a partir del número de parcelas del IFN. La provincia con más representación de

la especie es Lérida, seguida de Huesca y Gerona. Según la tabla 8 más de la mitad de las masas (55,9%) son monoespecíficas, mientras que en el resto el pino negro aparece mezclado con otras especies. El porcentaje de masas monoespecíficas varía entre provincias, del 39,1% en Barcelona hasta el 64,5% de Gerona.

En la figura 2 se ha representado la distribución de las masas mixtas según especie dominante por provincia. No se han incluido los datos de Navarra ya que se considera que 6 parcelas es un número demasiado reducido para ser representativo. En esta figura se observa que dentro de las masas mixtas la especie dominante más frecuente es *Pinus sylvestris*, con un 47,1%

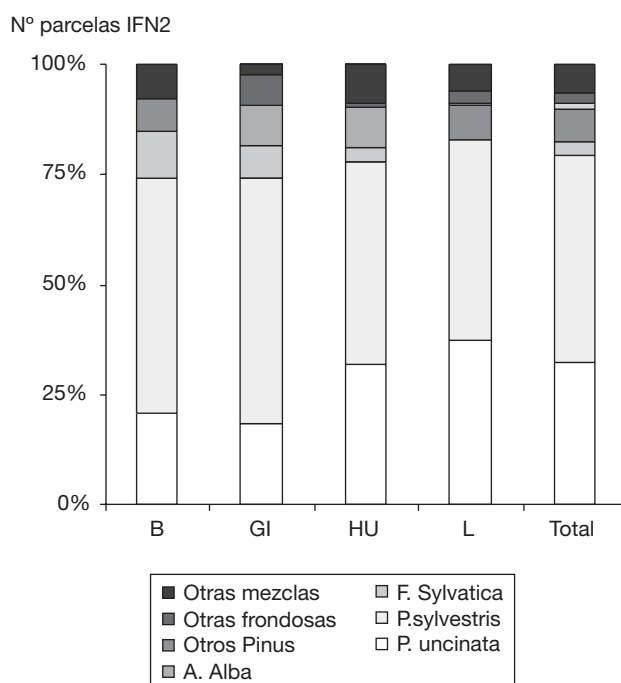


Figura 2. Porcentaje de masas mixtas con *Pinus uncinata* por especie dominante (> 50% del área basimétrica) y provincia, calculado a partir de las parcelas mixtas del 2.º Inventario Forestal Nacional. B: Barcelona. GI: Gerona. HU: Huesca. L: Lleida. Total: incluye también Navarra.

Tabla 8. Porcentaje por provincia de masas monoespecíficas y mixtas de *Pinus uncinata*, calculado a partir del número de parcelas del 2º Inventario Forestal Nacional (dato entre paréntesis)

Parcelas	Barcelona	Gerona	Lleida	Huesca	Navarra	Total
Monoespecíficas	39,1% (25)	64,5% (78)	59,7% (326)	42,4% (67)	62,5% (10)	55,9% (506)
Mixtas	60,9% (39)	35,5% (43)	40,3% (220)	57,6% (91)	37,5% (6)	44,1% (399)
Total	(64)	(121)	(546)	(158)	(16)	(905)

Tabla 9. Valores medios, mínimos y máximos de las principales variables dasométricas por hectárea de las masas monoespecíficas y mixtas de *Pinus uncinata*, calculados a partir de las parcelas del 2° Inventario Forestal Nacional

	N.° pies/ha	Dg (cm)	Do (cm)	Hm (m)	Ho (m)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)	SDI
Monoespecíficas	636,7 5,1-2939,1	22,6 7,9-78,3	30,9 7,9-75,5	8,6 3,0-22,4	10,6 3,0-22,7	20,3 0,6-78,0	107,4 1,6-453,9	440,0 18,0-1759,8
Mixtas	694,0 19,2-2715,4	21,5 9,7-53,5	32,3 13,8-63,0	9,6 3,7-17,9	12,5 4,8-23,4	22,3 1,0-69,7	132,1 3,1-554,9	483,7 25,5-1270,0

Dg: diámetro medio cuadrático. Do: diámetro dominante. Hm: altura media. Ho: altura dominante. G: área basimétrica. V: volumen con corteza. SDI: índice de densidad de Reineke.

del total, seguida por el propio pino negro, que domina en un 32,1%. Las masas mixtas de *Pinus uncinata* y *P. sylvestris*, donde se encuentran los híbridos entre ambas especies, se sitúan en las áreas secas y soleadas del límite inferior del piso subalpino (Costa *et al.*, 1997), ocupando el pino silvestre las mejores estaciones. Otras especies que requieren una mayor humedad como *Abies alba* o *Fagus sylvatica* son dominantes en un reducido porcentaje de parcelas. Si a las masas monoespecíficas añadimos aquellas mixtas en las que domina el pino negro, obtenemos que en un 70% del total de las parcelas en las que aparece *Pinus uncinata* ésta es la especie dominante, reflejando la poca tolerancia de la especie a la competencia.

Se han caracterizado dasométricamente las masas monoespecíficas y mixtas de *Pinus uncinata*, reflejándose el valor medio, mínimo y máximo de las principales variables de masa (tabla 9). Las alturas dominantes encontradas en las masas monoespecíficas de esta especie son relativamente bajas, con una altura dominante máxima encontrada de 22,7 m. En esta tabla 9 se observan las altas espesuras que pueden presentar las masas de pino negro, llegando a alcanzar un área basimétrica de 78 m²/ha. Expresando la espesura mediante el índice de densidad de Reineke, la espesura más elevada encontrada se da en una masa monoespecífica con un valor de 1.759,8, por lo que se con-

sidera esta cifra como el máximo índice de densidad de Reineke para la especie.

Existe una gran variabilidad de espesuras, con valores mínimos del área basimétrica e índice densidad de Reineke de 0,6 m²/ha y 18,0 respectivamente (tabla 9). Estas cifras tan bajas se deben a que se han seleccionado todas las parcelas del IFN2 en las que aparece al menos un pie de *Pinus uncinata*, independientemente del número de pies inventariables de la parcela y, por tanto, de la espesura de la misma. Por este motivo, los datos obtenidos del IFN2 sobre las masas de *Pinus uncinata* se han clasificado según los tres intervalos del índice de densidad de Reineke propuestos por Long (1985) (tabla 10). Como se observa en la tabla 10 la mayor parte de las masas presentan bajas espesuras ($SDI < 35\% SDI_{\max}$), incluyéndose en esta categoría un 76,7% de las monoespecíficas y un 71,1 % de las mixtas.

Con respecto a las masas monoespecíficas, en la tabla 11 se presentan los valores medios de las principales variables de masa para las tres espesuras definidas según rangos del diámetro medio cuadrático, reflejando en cierta medida la evolución de estas variables con la edad, aunque también dependerán de otras variables como la calidad de estación.

En la clase de espesura baja ($SDI < 35\% SDI_{\max}$) las áreas basimétricas medias se sitúan en torno a

Tabla 10. Porcentaje de masas monoespecíficas y mixtas de *Pinus uncinata* según rangos del índice de densidad de Reineke, calculado a partir del número de parcelas del 2° Inventario Forestal Nacional (dato entre paréntesis)

	SDI			Total
	> 60% $SDI_{\max}$	35%-60% $SDI_{\max}$	< 35% $SDI_{\max}$	
Monoespecíficas	3,6% (18)	19,7% (100)	76,7% (388)	(506)
Mixtas	2,8% (11)	26,1% (104)	71,1% (284)	(399)

SDI: índice de densidad de Reineke. $SDI_{\max}$: máximo índice de densidad de Reineke encontrado en las parcelas del IFN2 con presencia de *Pinus uncinata*.

Tabla 11. Valores medios de las principales variables dasométricas por hectárea para las masas monoespecíficas de *Pinus uncinata* según rangos del índice de densidad de Reineke y rangos del diámetro medio cuadrático, calculados a partir de las parcelas del 2° Inventario Forestal Nacional

D	n	N.º pies/ha	Dg (cm)	Do (cm)	Hm (m)	Ho (m)	G (m²/ha)	V (m³/ha)	SDI
<i>SDI > 60% SDI_{máx}</i>									
7,5-12,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5-17,5	5	2.592,8	15,7	27,9	8,4	11,4	50,1	286,8	1.224,4
17,5-22,5	9	1.721,5	20,8	37,0	10,1	12,7	57,2	317,6	1.256,1
22,5-27,5	3	1.023,5	26,2	46,8	11,4	14,4	55,4	324,1	1.106,9
27,5-32,5	1	815,7	29,9	41,8	14,3	16,9	57,2	370,2	1.086,2
32,5-37,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—
37,5-42,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—
>42,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	18	1.796,9	20,8	36,4	10,1	12,8	54,9	313,0	1.213,0
mín.-máx.		815,7-2.939,1	14,0-29,9	23,6-59,4	6,6-15,8	8,1-17,5	45,5-78,0	203,7-453,9	1058,1-1759,8
<i>35% SDI_{máx} < SDI < 60% SDI_{máx}</i>									
7,5-12,5	1	2.864,8	12,5	18,6	7,9	9,1	35,1	257,3	939,6
12,5-17,5	21	1.731,1	15,6	27,1	8,2	11,1	32,5	189,0	797,1
17,5-22,5	36	1.205,8	19,6	33,0	9,1	12,3	36,0	195,5	807,9
22,5-27,5	28	815,6	24,3	37,8	10,4	13,0	37,5	206,5	772,4
27,5-32,5	11	606,8	29,4	43,4	12,8	15,5	40,9	248,2	781,4
32,5-37,5	3	440,4	34,7	48,0	16,5	18,8	41,5	311,9	743,4
37,5-42,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—
>42,5	0	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	100	1.134,6	21,6	34,5	9,9	12,8	36,4	207,1	792,1
mín.-máx.		371,6-2.864,8	12,5-36,1	18,6-51,8	5,8-19,8	7,6-22,0	25,6-51,9	105,9-396,5	616,6-1038,8
<i>SDI < 35% SDI_{máx}</i>									
7,5-12,5	27	668,5	10,4	13,7	4,7	5,5	6,4	27,6	179,5
12,5-17,5	82	753,7	15,2	23,3	6,3	8,4	13,3	63,6	331,0
17,5-22,5	101	470,5	20,2	28,3	7,8	9,9	15,0	75,1	333,1
22,5-27,5	89	361,0	24,6	32,2	9,1	11,1	16,9	86,6	346,7
27,5-32,5	44	248,4	29,7	35,8	9,8	11,4	16,8	84,0	321,4
32,5-37,5	27	167,7	34,6	38,5	11,2	12,1	15,9	81,3	283,8
37,5-42,5	7	147,7	39,3	42,4	9,9	10,9	18,1	78,1	307,6
>42,5	11	32,2	58,4	56,7	11,2	11,2	7,0	26,3	104,5
Total	388	454,5	23,0	29,7	8,2	9,9	14,6	72,1	313,4
mín.-máx.		5,1-2.134,2	7,9-78,3	7,9-75,5	3,0-22,4	3,0-22,7	0,6-34,0	1,6-218,7	18,0-613,1

SDI: índice de densidad de Reineke. SDI_{máx}: máximo índice de densidad de Reineke encontrado en las parcelas del 2° IFN con presencia de *Pinus uncinata*. n: número de parcelas. D: rango de diámetros medios cuadráticos. n: número de parcelas. Dg: diámetro medio cuadrático. Do: diámetro dominante. Hm: altura media. Ho: altura dominante. G: área basimétrica. V: volumen con corteza.

15 m²/ha, mientras que en las espesuras medias y altas son siempre superiores a 25 m²/ha, con valores medios en torno a 36 m²/ha para la espesura media (35% SDI_{máx} < SDI < 60% SDI_{máx}) y 55 m²/ha para la espesura alta (SDI > 60% SDI_{máx}). La reducida variación del área basimétrica según aumenta el diámetro medio cuadrático en la espesura alta refleja que estas masas deben estar próximas a la máxima densidad biológica de la especie.

Las masas con espesuras medias y altas, aunque suponen sólo un 23,3% de las masas monoespecíficas, reflejan el potencial productivo de la especie en las mejores estaciones, pudiendo alcanzar existencias de hasta 454 m³/ha y diámetros dominantes de 59,4 cm. En las 13 parcelas permanentes que dispone el departamento de Silvicultura del CIFOR-INIA en masas de pino negro en los Pirineos centrales (Huesca y Llei-

Tabla 12. Existencias de *Pinus uncinata* por clase diamétrica, para todo el territorio nacional (España)

Clase diamétrica	N.º pies (×1.000)	G (m²)	Vcc (m³)	Vsc (m³)	IAVC (m³ año⁻¹)
10	18.024,8	140.398	689.710	522.989	44.660
15	13.237,9	232.285	1.295.150	1.013.619	53.155
20	10.207,6	316.647	1.689.103	1.378.152	50.632
25	6.281,1	304.386	1.636.387	1.375.705	37.606
30	3.710,1	257.295	1.372.786	1.173.319	25.977
35	2.015,4	190.777	1.045.409	904.574	16.724
40	990,4	122.965	659.441	574.782	9.237
45	377,3	59.064	311.488	273.364	3.921
50	193,2	37.365	190.554	168.154	2.155
55	106,9	24.864	119.750	106.078	1.227
60	52,7	14.791	64.373	57.456	600
65	20,3	6.546	31.979	28.687	272
> 70	45,9	22.998	87.786	79.566	611
Total	55.264,3	1.730.381	9.193.916	7.656.446	246.776

Fuente: DGCONA (1998). G: área basimétrica. Vcc: volumen con corteza. Vsc: volumen sin corteza. IAVC: incremento anual de volumen con corteza.

da), situadas todas ellas en espesuras medias y altas (SDI = 612-1396), los valores máximos encontrados en volumen son del mismo orden (450-500 m³/ha), aunque con diámetros dominantes máximos algo inferiores (41 cm) (Coquillas, 2002).

Por último, en la tabla 12 se presentan las existencias por clases diamétricas de *Pinus uncinata* según el IFN2 (DGCONA, 1998) con el fin de reflejar cuantitativamente la producción de la especie. Las existencias totales de la especie son 9.193.916 m³, de las cuales un 60% corresponde a árboles mayores de 22,5 cm de diámetro normal. La tasa de crecimiento de la especie es de 246.776 m³/año (un 2,68% de las existencias), con un 60,15% del crecimiento anual concentrado en árboles con diámetro inferior a 22,5 cm.

La productividad de estos pinares es baja en general, aunque algo mayor en sus cotas inferiores y sobre relieves suaves. En las 13 parcelas permanentes del departamento de Silvicultura del CIFOR-INIA, los crecimientos medios observados varían de 2,1 m³/ha · año a los 122 años hasta 7,1 m³/ha · año a los 50 años en calidades medias y altas (Coquillas, 2002). Sin embargo, los crecimientos son muy inferiores en pinares más o menos abiertos de altura. Cantegrel (1987), en un estudio de tres poblaciones de pino negro situadas en cotas elevadas, encuentra una variación del incremento corriente en volumen desde 0,8 m³/ha · año en pinares abiertos hasta 1,4 m³/ha · año en rodales con mayor densidad.

Curvas de calidad de estación

La función seleccionada para modelizar el crecimiento en altura dominante ha sido la ecuación desarrollada por Mc-Dill y Amateis (1992). Esta ecuación verifica las propiedades de polimorfismo, reciprocidad e invarianza respecto de la edad típica. La expresión final para el modelo desarrollado es:

$$H_2 = \frac{24,4295}{1 - \left[\left(1 - \frac{24,4295}{H_1} \right) \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1,5464} \right]}$$

donde H_i indica la altura dominante (m) a la edad T_i (años). Los resultados del ajuste de la función anterior a los datos de los 84 análisis de tronco, así como a la muestra de validación de las 13 parcelas permanentes se recoge en la tabla 13.

El modelo anterior se caracteriza por presentar una asíntota común (24,4295 m) para todas las calidades, y un factor de forma específico para cada estación. La asíntota obtenida es adecuada para la especie, ya que la altura dominante máxima encontrada en las parcelas del IFN2 es de 22,7 m (tabla 10). Con objeto de definir de forma categórica las diferentes calidades de estación para la especie se desarrollan de forma gráfica curvas que se fuerzan a pasar por los pares edad-altura dominante (100; 8), (100; 12), (100; 16) y (100; 20) (figura 3).

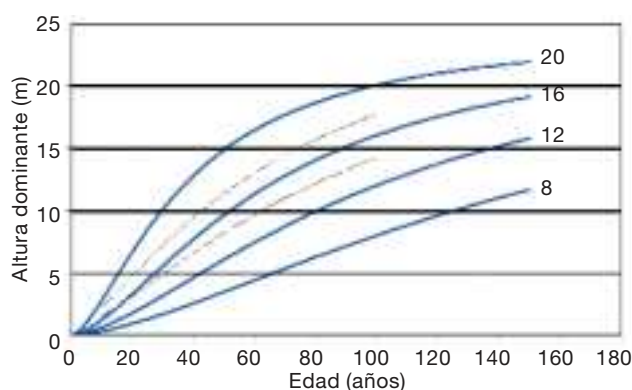
Tabla 13. Estadísticos del ajuste de la función de crecimiento de Mc-Dill y Amateis (1992) a los análisis de tronco y estadísticos de la validación

	Error	EMC	Pr > t	EF %*
Datos ajuste	-0,0124	0,2569	0,044	91,65
Datos validación	-0,0045	0,4292	0,972	94,53

EMC: error medio cuadrático. EF%: eficiencia del modelo. * El valor de la eficiencia del modelo está calculado sin considerar parámetros autorregresivos de ajuste, sino aplicando directamente el modelo a los datos.

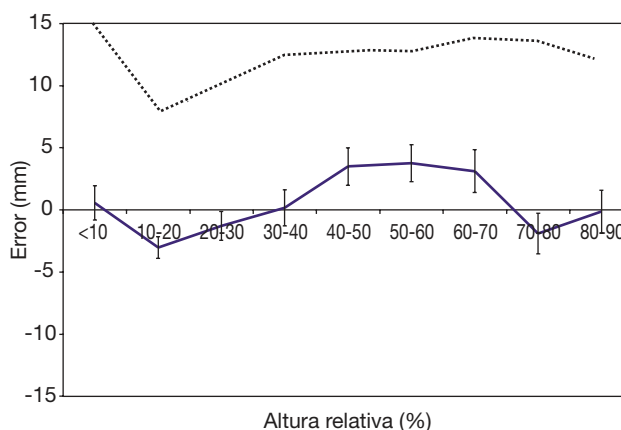
En la figura 3 se incluyen asimismo las curvas de calidad de estación propuestas por Pita (1967a), donde únicamente se definen dos calidades caracterizadas a la edad índice de 50 años por las alturas dominantes 11,3 m y 8,2 m. El modelo desarrollado por Pita utilizaba únicamente los 38 análisis de la muestra de 1966, muestra con un rango de dispersión inferior a la utilizada en el presente trabajo. Comparando ambos modelos vemos que el patrón general de la curva es similar, aunque difieren algo para edades inferiores a 30 años.

El modelo de crecimiento en altura dominante desarrollado no debe ser aplicado a masas cuya edad esté fuera del rango de edades bien representadas en la muestra (130 años). Este modelo puede ser utilizado en el futuro como herramienta clave en el desarrollo de modelos de crecimiento tanto de masa como de árbol individual.

**Figura 3.** Curvas de calidad de estación para *Pinus uncinata* en Pirineos. Edad típica: 100 años. En línea punteada se incluye el modelo propuesto por Pita (1967a).

Ecuaciones de perfil

De entre las funciones de perfil analizadas la seleccionada es una función modificada de la función original de exponente variable de Kozak (1988), en la que dos términos han sido omitidos al resultar sus parámetros no significativos en el ajuste. En la tabla 14 se presentan los estadísticos obtenidos en el ajuste del modelo de ecuación de perfil de Kozak (1988) a la muestra de árboles tipo. Esta función es la que ha presentado mejores resultados en cuanto a eficiencia predictiva del modelo, sesgo del error y valor medio del error absoluto. La figura 4 representa la evolución del valor medio del error, y de la raíz del error medio cuadrático del modelo elegido, a lo largo de la altura relativa del fuste.

**Figura 4.** Valor medio e intervalo de confianza al 95% del error (línea sólida) y raíz del error medio cuadrático (RMCE-línea punteada) en función de la altura relativa a lo largo del tronco del árbol para la ecuación de perfil de Kozak (1998).**Tabla 14.** Estadísticos del ajuste de la función de perfil propuesta por Kozak (1988) a la muestra de árboles tipo

	N	Error	E	EMC	Error%	Pr > t	EF%
Kozak 88	6	0,47	9,01	1,515	0,41	0,0579	97,0

N: número de parámetros del modelo. |E|: error absoluto. EMC: error medio cuadrático. EF%: eficiencia del modelo.

A partir de los resultados incluidos en la tabla 14 se comprueba que el modelo de Kozak (1988) presenta un error medio de predicción de 0,47 mm, no significativo a un nivel $\alpha=0,05$. El error medio absoluto es inferior a 1 cm, mientras que el error medio relativo no alcanza el 0,5 %. En el análisis del error de predicción a lo largo del fuste (figura 4), se observa que el valor de la raíz del error medio cuadrático de predicción se mantiene constante a lo largo del fuste, en un valor cercano a 1 cm. En cuanto al error medio de predicción, éste es inferior a 3 mm en todos los intervalos de altura relativa, no detectándose tendencias ni incremento en la varianza asociada al mismo. El error medio es no significativo en la parte inferior del tronco (altura relativa inferior a 10%). La correcta predicción de la forma en esta parte del tronco es muy importante, puesto que es donde se concentra la mayor cantidad de madera de calidad.

El modelo de Kozak (1988) se caracteriza porque el exponente que modifica a la variable derivada de la altura relativa no es constante, sino que varía de forma continua a lo largo del fuste. Se compararon diferentes alternativas para definir el punto de inflexión de la curva de perfil, fijándose el valor del parámetro p en 0,25 (altura relativa en tanto por 1 del punto de inflexión). La expresión final del modelo propuesto, desarrollado en forma logarítmica, es:

$$\log(d_s) = 0,23047 + 0,93135 \cdot \log(dbh) + 0,22016 \cdot \log(X) \cdot Z^2 -$$

$$0,06137 \cdot \log(X) \cdot \log(Z + 0,001) + 0,07798 \cdot \log(X) \cdot \sqrt{Z} + 0,18817 \cdot \log(X) \cdot \frac{dbh}{H_{total}}$$

$$\text{donde: } X = \left(\frac{1 - \sqrt{\frac{h_s}{H_{total}}}}{(1 - \sqrt{p})} \right) \quad Z = \frac{h_s}{H_{total}} \quad ;$$

d_s , diámetro de la sección (mm); dbh , diámetro normal (mm); H_{total} , altura total del árbol (dm); y h_s , altura de la sección (dm).

La figura 5 muestra el perfil del fuste de dos pies de *Pinus uncinata*, uno de 35 cm de diámetro y 16 metros de altura y otro de 28 cm de diámetro y 20 m de altura, obtenidos con el modelo ajustado.

Las ecuaciones de perfil, además de definir la forma del fuste, permiten obtener por integración (analítica o numérica) una estimación del volumen total del tronco y del volumen de las diferentes secciones en las cuales puede dividirse el tronco de acuerdo a los usos

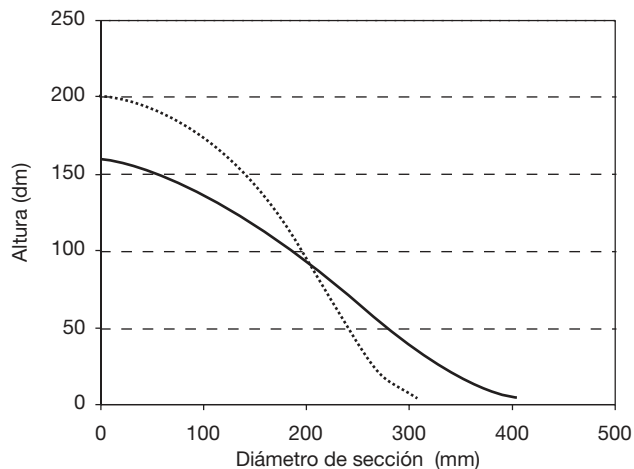


Figura 5. Ejemplo del perfil del fuste de dos pies de *Pinus uncinata* obtenidos con la ecuación de Kozak (1988) ajustada.

finales de la madera según su dimensión. La función seleccionada presenta dos puntos débiles que dificultan su utilización en la predicción de volúmenes. Por un lado, la función no permite su integración directa entre dos alturas cualesquiera. Por otra parte, la altura de la sección no puede ser despejada a partir la expresión del modelo, por lo que no es posible obtener una relación matemática que nos proporcione el valor de la altura a la que se alcanza un determinado diámetro.

Para evitar estos problemas se propone calcular el volumen mediante integración numérica de la función. Para ello se determina el diámetro de sección cada 0,5 metros de altura a lo largo del fuste utilizando el modelo desarrollado. El volumen de la troza comprendida entre dos secciones se calcula mediante la fórmula de cubicación de Smalian (1837), y se define el uso de la troza de acuerdo al diámetro menor de la misma. Finalmente, se determina el volumen de madera con destino a sierra o trituración mediante la suma de las trozas correspondientes a cada uso. Los diámetros límite de madera de sierra y madera de trituración se fijan en 25 y 7 cm respectivamente.

Aplicando esta metodología al modelo seleccionado, se ha desarrollado la tabla de cubicación de árbol individual de doble entrada recogida en la tabla 15, en la que para cada diámetro normal y altura total se indica el volumen maderable total (hasta 7 cm punta delgada) y el volumen de madera de sierra del pie, ambos en dm^3 .

Esta tabla de cubicación constituye por sí sola una útil herramienta en la gestión, valoración y planificación de los aprovechamientos de los pinares de pino negro, al permitir estimar el volumen de sierra del árbol y, por lo tanto, de las cortas. Por otra parte, el conocimiento de la

Tabla 15. Tabla de cubicación de doble entrada para el volumen maderable total y volumen de madera de sierra (dm³) para *Pinus uncinata*

Ø (mm)	Altura (dm)																	
	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
100	25 0	29 0	34 0	38 0	42 0	47 0	51 0	56 0	60 0									
120	38 0	44 0	51 0	57 0	64 0	71 0	78 0	85 0	91 0									
140	52 0	61 0	69 0	78 0	87 0	97 0	106 0	115 0	124 0	134 0	143 0	152 0	162 0					
160	67 0	78 0	90 0	101 0	113 0	125 0	136 0	148 0	160 0	172 0	184 0	196 0	209 0					
180	84 0	98 0	112 0	126 0	140 0	155 0	170 0	185 0	199 0	214 0	229 0	244 0	259 0					
200	103 0	119 0	136 0	153 0	171 0	188 0	206 0	224 0	241 0	260 0	278 0	296 0	314 0	0	0	0		
220	123 0	143 0	162 0	182 0	203 0	224 0	245 0	266 0	287 0	309 0	330 0	352 0	374 0	396 0	418 0			
240	145 0	168 0	191 0	214 0	238 0	262 0	286 0	311 0	336 0	361 0	387 0	412 0	437 0	463 0	488 0			
260	170 87	195 91	221 95	248 100	275 104	303 108	331 113	360 117	388 122	417 126	446 131	475 131	505 135	534 135	564 140	594 145		
280	196 120	225 130	254 140	284 150	315 160	347 170	379 180	411 191	444 201	476 211	510 217	543 227	576 237	610 248	644 258	678 269		
300	225 152	257 168	290 185	323 201	358 213	393 229	429 246	465 263	502 280	539 297	577 314	614 331	652 348	690 370	729 387	767 404	806 421	844 438
320				365 253	404 271	443 295	483 319	523 338	564 362	606 386	648 411	690 435	732 464	775 489	818 513	861 538	904 562	947 592
340									630 447	676 479	722 511	769 539	816 571	863 604	911 636	959 674	1.007 707	1.056 739
360									699 528	749 569	800 605	852 645	904 681	956 722	1.009 764	1.062 800	1.115 842	1.169 883
380									771 616	827 660	883 704	939 749	996 794	1.054 839	1.112 885	1.170 930	1.228 981	1.287 1.027
400													1.092 904	1.156 958	1.219 1.008	1.282 1.063	1.346 1.119	1.411 1.174
420													1.193 1.015	1.262 1.074	1.330 1.134	1.399 1.194	1.469 1.259	1.539 1.319
440													1.298 1.132	1.372 1.196	1.446 1.266	1.521 1.331	1.597 1.396	1.673 1.467

forma del tronco a través de la ecuación de perfil puede tener gran utilidad en el estudio de la resistencia mecánica del árbol a la rotura por efecto de agentes tales como el viento o la nieve, factores causantes de importantes daños en las masas de *Pinus uncinata*.

Conclusiones

La caracterización dasométrica realizada para las masas de *Pinus uncinata* del Pirineo muestra que solo el 23,3 % de las masas monoespecíficas se encuentran en espesuras medias y altas. Estas masas reflejan el potencial productivo de la especie en las mejores estaciones.

El modelo de crecimiento en altura dominante seleccionado ha sido el propuesto por Mac-Dill y Amateis (1992). La aplicación de este modelo de calidad unida a la caracterización dasométrica realizada, constituyen la base para la clasificación de las masas de *Pinus uncinata* en el Pirineo.

La función de perfil seleccionada ha sido la función modificada de Kozak (1988), por haber presentado los mejores resultados en cuanto a eficiencia predictiva del modelo, sesgo del error y valor medio del error absoluto. Con este modelo se ha desarrollado una tabla de cubicación de árbol individual que permite estimar tanto el volumen total maderable del árbol como el volumen de sierra contenido en el mismo.

Las aportaciones realizadas en este trabajo sobre las caracterización dasométrica, el modelo de calidad y la función de perfil para las masas de pino negro se consideran básicas para la futura construcción de modelos matemáticos de crecimiento y producción que faciliten la gestión y ordenación de los pinares de pino negro y garanticen su sostenibilidad.

Agradecimientos

A todos aquellos que han colaborado en la toma de datos de las parcelas permanentes del departamento de Silvicultura del CIFOR-INIA. A Paco Cano por su inestimable ayuda en la búsqueda de rodales de pino negro en la Cerdanya para realizar los análisis de tronco.

Referencias bibliográficas

AMIDON E.L., 1984. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. For Sci 30, 166-171.

- BAILEY R.L., CLUTTER J.L., 1974. Base-age invariant polymorphic site curve. For Sci 20, 155-159.
- BOSCH O., GINE L., RAMADORI E.D., BERNAT A., GUTIÉRREZ E., 1992. Disturbance, age and size structure in stands of *Pinus uncinata* Ram. Pirineos 140, 5-14.
- BREDENKAMP B.V., BURKHART H.E., 1990. An examination of spacing indices for *Eucalyptus grandis*. Can J For Res 20, 1909-1916.
- BRUCE R., CURTISS L., VAN COEVERING C., 1968. Development of a system of taper and volume tables for red alder. For Sci 14, 339-350.
- CABI, 2000. Forestry Compendium Global Module. Wallingford, UK: CAB International
- CAMARERO J.J., GUERRERO-CAMPO J., GUTIÉRREZ E., 1998. Tree-ring growth and structure of *Pinus uncinata* and *Pinus sylvestris* in the Central Spanish Pyrenees. Arctic and Alpine Research 30(1), 1-10.
- CANTEGREL R., 1983. Le pin à crochets pyrénéen: Biologie, Biochimie, Sylviculture. Acta Biologica Montana 2-3, 87-330.
- CANTEGREL R., 1987. Productive Ligneuse et organisation des marges forestières a *Pinus uncinata* Ram en Pyrénées occidentales. Pirineos 130, 3-27.
- CAO Q.V., 1993. Estimating coefficients of base-age invariant site index equations. Can J For Res 23, 2343-2347.
- COQUILLAS V., 2002. *Pinus uncinata* Ram. en los Pirineos españoles: caracterización selvícola de las masas forestales mediante los datos del Inventario Forestal Nacional 2 y proposición de curvas de calidad de estación y tablas de producción. Informe de prácticas (sin publicar). INIA-Université Montesquieu Bordeaux, Madrid.
- COSTA M., MORLA C., SAINZ OLLERO H. (eds.). Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica. Ed. Planeta, 572 pp.
- DEMAERSCHALK J., 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. For Sci 18, 241-245.
- DGCONA, 1998. Segundo Inventario Forestal Nacional 1986-1996, España. DGCONA, Madrid, 337 pp.
- GÉNOVA R., 1986. Dendroclimatology of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) in the central plain of Spain. Tree Ring Bulletin 46, 3-12.
- GOELZ J.C.G., BURK T.E., 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. Can J For Res 22, 776-784.
- GUTIÉRREZ E., CAMARERO J.J., TARDIF J., BOSCH O., RIBAS M., 1998. Tendencias recientes del crecimiento y la regeneración en bosques subalpinos del Parque Nacional D'Aigüestortes i estany de Sant Maurici. Ecología 12, 251-283.
- HUANG S., 1997. Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework. En: Amaro A., Tomé M. (Eds.) Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation. Edições Salamandra, Oeiras, pp. 591.
- ICONA, 1990. Segundo Inventario Forestal Nacional. Explicaciones y métodos, 1986-1995. ICONA, Madrid, 174 pp.

- JIMÉNEZ J., AGUIRRE O., NIEMBRO N., NAVAR J., DOMÍNGUEZ A., 1994. Determinación de la forma externa de *Pinus hartwegii* Lindl. En el noroeste de México. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales 3(2), 175-182.
- KOZAK A., MUNRO D., SMITH J. 1969. Taper functions and their applications in forest inventory. Forestry Chronicle 45(4), 278-283.
- KOZAK A., 1988. A variable-exponent taper equation. Can J For Res 18, 1363-1368.
- KORF V., 1939. A mathematical definition of stand volume growth law. Lesnicka Prace 18, 337-379.
- LONG J.N., 1985. A practical approach to density management. Forestry Chronicle 61, 23-27.
- MADRIGAL A., 1994. Ordenación de montes arbolados. ICONA, Madrid, 375 p.
- MAX T., BURKHART H.E., 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. For Sci 22, 283-289.
- Mc-DILL M.E., AMATEIS R.L., 1992. Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. For Sci 38(2), 409-429.
- NEET-SARQUEDA C., PLUMETTAZ CLOT A.C., BÉCHOLEY I., 1988. Mise en évidence de l'hybridation introgressive entre *Pinus sylvestris* et *Pinus uncinata* DC. en Valais (Suisse) par deux méthodes multivariées. Botanica Helvetica 98(2), 161-169.
- NOVO N., 2001. Análisis de funciones de perfil de tronco y construcción de tarifas de cubicación con clasificación de productos para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. Trabajo de Investigación Tutelado. Universidad de Santiago de compostela. 113 p. + anejos.
- PARRESOL B., HOTVEDT J., CAO Q., 1987. A volume and taper prediction system for baldcypress. Can J For Res 17, 250-259.
- PITA P.A., 1967a. Clasificación provisional de las calidades de la estación en las masas de *P. pinaster* Sol. (continental) y *P. uncinata* Ram. de la Península Ibérica. Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, pp. 125-138.
- PITA P.A., 1967b. Crecimiento y producción de las masas de *P. pinaster* (continental), *E. camaldulensis* y *P. uncinata*. Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, pp. 368-387.
- PUETTMANN K.J., HANN D.W., HIBBS D.E., 1993. Evaluation of the size-density relationships for pure Red alder and Douglas-fir stands. For Sci 39(1), 2-27.
- REINEKE L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. J Agric Res 46, 627-638.
- RICHARDS F.J., 1959. A flexible growth function for empirical use. J Exp Bot 10, 290-300.
- RIEMER T., GADOW K.V., SLOBODA B., 1995. Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. Allg Forst-und J-Ztg 166(7), 144-147.
- RÍO M. DEL, RIVAS J., CONDÉS S., MARTÍNEZ-MILLÁN J., MONTERO G., CAÑELLAS I., ORDÓÑEZ C., PANDO V., SAN MARTÍN R., BRAVO F., 2002. Basifor: aplicación informática para el manejo de bases de datos del Segundo Inventario Forestal Nacional. En: Bravo F., Río M. del, Del Peso C. (Eds.) El Inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la Gestión Forestal Sostenible. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Valladolid, 191 pp.
- RÍO M., MONTERO G., BRAVO F., 2001. Analysis of diameter-density relationships and shelf-thinning in non-thinned even-aged Scots pine stands. For Ecol and Man 142, 79-87.
- RUIZ DE LA TORRE J., 1979. Árboles y Arbustos de la España Peninsular. ETSIM. Madrid.
- SCHUELLER J., ROLLAND C., 1994. Influence stationnelle sur la croissance du Pin à crochets (*Pinus uncinata* Ramond). Schweiz. Z. Forstwes 145(9), 739-755.
- SCHUMACHER F.X., 1939. A new growth function curve and its application to timber-yield studies. J For 37, 819-820.
- SMALIAN H.L., 1837. Beitrag zur Holzmeßkunst. Stralsund.
- THOMAS C., PARRESOL B., 1991. Simple flexible trigonometric taper equations. Can J For Res 21, 1132-1137.
- ZEIDE B., 1985. Tolerance and self-tolerance of trees. For Ecol and Man 13, 149-166.