

BASES PARA LA GESTIÓN DE MASAS
NATURALES DE *PINUS HALEPENSIS*
MILL. EN EL VALLE DEL EBRO



ANA M^a CABANILLAS SALDAÑA

Publicaciones del Consejo de Protección
de la Naturaleza de Aragón

SERIE: INVESTIGACIÓN

© Ana M^a Cabanillas Saldaña.

© De la edición, Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.

Foto portada:

Ana M^a Cabanillas Saldaña .

BASES PARA LA GESTIÓN DE MASAS NATURALES
DE *PINUS HALEPENSIS* MILL. EN EL VALLE DEL
EBRO

ANA M^a CABANILLAS SALDAÑA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, y como no podría ser de otra manera, quiero agradecer la inmensa paciencia y dedicación que han mostrado los directores de esta tesis, los Doctores D. Alberto Rojo y Alboreca y D. Marcos Barrio Anta, sin cuya colaboración y continuas correcciones no habría sido posible realizar este trabajo, máxime si se tiene en cuenta que quien la suscribe no forma parte del colectivo investigador, sino que ha dedicado y dedica su actividad profesional a la gestión del medio natural, y dentro de este campo a la gestión forestal, compatibilizando el trabajo habitual en este sector con la realización de la tesis, lo cual supone un dedicación en tiempo y esfuerzo muy por encima de lo que aconseja el trabajo habitual, y la salud física y mental.

En segundo lugar, quiero agradecer la colaboración realizada, sobre todo en materia estadística e informática, partes fundamentales también de esta tesis, sin las cuales tampoco habría sido posible su realización, al también investigador del CITA D. Eduardo Notivol Paíno. Pero sobre todo, quiero agradecer a Chicho, apodo por el que le conocemos todos los familiares y amigos, el cariño y la paciencia, con que ha soportado los malos momentos pasados durante los largos seis años de dedicación a este trabajo, con el consecuente desgaste que supone, sobre todo emocional, cuando te ves inmerso en un callejón sin salida y sólo los más cercanos pueden ayudarte y animarte a continuar.

En tercer lugar, y no por ello menos importante, quiero agradecer el enorme esfuerzo realizado por mis padres para hacer posible que obtuviera unos estudios superiores, desplazándome desde mi pueblo, Torrijos, a Madrid, único lugar entonces donde se podía cursar la titulación por mí escogida, Ingeniería de Montes, a pesar de los esfuerzos de mi madre por dirigirme hacia otro que ella creía de mayor porvenir, y desde luego no se equivocaba, si lo pesamos en términos económicos, como es la Ingeniería Industrial.

En cuarto lugar, agradecer a la entonces Ingeniero Técnico Forestal, y ahora ya Ingeniero de Montes, Dña. M^a Jesús Velasco Velasco, a los Agentes de Protección de la Naturaleza, D. Ricardo Serrano Bella, D. Jesús Gracia Sánchez y D. Antonio Fau Aragón, así como a los capataces y peones D. José Manuel Altarriba Salvador y D. Francisco Jesús Gracia

Pastor, sin cuya ayuda en las mediciones de campo y corta de arbolado, pasando tanto un frío como un calor insoportables, típicos de estos parajes, durante largas e interminables jornadas, tampoco hubiera sido posible desarrollar este estudio.

Por último, agradecer a todos los amigos y compañeros, que sabiendo de la realización de esta tesis, me han ayudado de una u otra manera, científicamente, técnicamente o simplemente acompañándome a tomar unos vinos para relajarme, incluso animándome haciendo apuestas sobre la finalización de este trabajo.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	16
1.2. EL PINO CARRASCO (<i>Pinus halepensis</i> Mill.)	19
1.2.1. Descripción botánica	19
1.2.2. Distribución y características ecológicas	20
1.2.3. Superficie e importancia económica de <i>Pinus halepensis</i> en España y Aragón	23
1.2.4. Algunas generalidades para la silvicultura de la especie	28
1.3. ZONA DE ESTUDIO	35
1.3.1. Situación y Propiedad de los terrenos	35
1.3.2. Descripción del medio natural	37
1.3.2.1. Fisiografía	37
1.3.2.2. Geología	38
1.3.2.3. Edafología	39
1.3.2.4. Clima	40
1.3.2.5. Vegetación potencial y regiones naturales	41
1.3.3. Características generales de las masas de estudio	42
1.3.4. Evolución histórica de las masas estudiadas	44
1.3.5. Análisis histórico de incendios	59
1.3.6. Algunas generalidades para la gestión de las masas de este estudio	64
1.3.6.1. Principios y objetivos a considerar en la gestión	64
1.3.6.2. Restricciones y problemática a considerar en la Gestión	66
1.3.6.3. Turnos	68

1.3.6.4. <i>Conclusión</i>	71
1.4. MATERIAL Y MÉTODOS	72
1.4.1.- Datos de origen	72
1.4.1.1. Diseño del inventario	72
1.4.1.2. Toma de datos	74
1.4.2. Ampliación de datos	80
1.4.3. Datos elaborados	81
1.4.4. Análisis estadísticos de los ajustes	84
1.4.5. Evaluación de los modelos	86
1.4.5.1. Evaluación gráfica	87
1.4.6. Comparación entre zonas	88
1.5. BIBLIOGRAFÍA	91
2. CAPÍTULO 2: RELACIÓN ALTURA-DIÁMETRO GENERALIZADA	101
2.1. INTRODUCCIÓN	101
2.2. MATERIAL Y MÉTODOS	102
2.2.1. Datos empleados	102
2.2.2. Modelos analizados	107
2.2.3. Metodología	110
2.2.3.1. Análisis estadísticos de los ajustes, selección de los modelos y evaluación gráfica	110
2.2.3.2. Comparación entre zonas	111
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
2.3.1. Selección de los modelos	111
2.3.2. Comparación entre zonas	121

2.4. CONCLUSIONES	122
2.5. BIBLIOGRAFÍA	123
3. CAPÍTULO 3: MODELIZACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DIAMÉTRICAS MEDIANTE LA FUNCIÓN WEIBULL BIPARAMÉTRICA	126
3.1. INTRODUCCIÓN	126
3.2. MATERIAL Y MÉTODOS	129
3.2.1. Datos empleados	129
3.2.2. La función Weibull y su relación con el diámetro medio	132
3.2.3. Análisis de la bondad de las estimaciones de la función Weibull y análisis estadístico de los ajustes	136
3.2.4. Evaluación gráfica	137
3.2.5. Comparación entre zonas	137
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	137
3.4. CONCLUSIONES	141
3.5. BIBLIOGRAFÍA	143
4. CAPÍTULO 4: FUNCIONES DE PERFIL Y TARIFA DE CUBICACIÓN	146
4.1.- INTRODUCCIÓN	146
4.2. MATERIAL Y MÉTODOS	148
4.2.1. Datos empleados	148
4.2.2. Modelos analizados	149

4.2.3. Metodología	153
4.2.3.1. Análisis estadísticos de los ajustes, selección de los modelos y evaluación gráfica	153
4.2.3.2. Comparación entre zonas	157
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	157
4.3.1. Selección de los modelos	157
4.3.2. Construcción de la tarifa de cubicación con clasificación de productos	170
4.3.3. Comparación entre zonas	173
4.4. CONCLUSIONES	174
4.5.- BIBLIOGRAFÍA	175
5. CAPÍTULO 5: CALIDAD DE ESTACIÓN	180
5.1. INTRODUCCIÓN	180
5.1.1. Curvas de calidad para <i>Pinus halepensis</i> en España	182
5.1.2. Curvas de calidad para <i>Pinus halepensis</i> en otros países	183
5.2. MATERIAL Y MÉTODOS	185
5.2.1. Datos empleados	185
5.2.2. Modelos analizados	188
5.2.2.1. Introducción	188
5.2.2.2. Modelos de crecimiento en altura dominante empleados	190
5.2.3. Metodología de ajuste	196
5.2.3.1. Ajuste de curvas de calidad con datos longitudinales	196
5.2.3.2. Comparación y selección de modelos	198
5.3. RESULTADOS	199

5.3.1. Elección del mejor modelo	199
5.3.2. Comparación con otras curvas de calidad para <i>Pinus halepensis</i> Mill.	208
5.4. CONCLUSIONES	210
5.5. BIBLIOGRAFÍA	212
6. CAPÍTULO 6: MODELOS DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN PARA <i>Pinus halepensis</i> Mill. EN LA DEPRESIÓN DEL EBRO	219
6.1. INTRODUCCIÓN	219
6.2. DIAGRAMA DE MANEJO DE LA DENSIDAD	221
6.2.1. Introducción	221
6.2.2. Material y Métodos	225
6.2.2.1. Datos empleados	225
6.2.2.2. Metodología de construcción de diagramas de densidad	227
6.2.3. Resultados y discusión	229
6.2.4. Aplicación del diagrama de manejo. Ejemplos prácticos	233
6.2.5. Conclusiones	247
6.3. MODELO ESTÁTICO CON DESAGREGACIÓN POR CLASES DIAMÉTRICAS	248
6.3.1. Introducción	248
6.3.2. Material y Métodos	248
6.3.2.1. Datos empleados	248
6.3.2.2. Datos de entrada al modelo y funciones asociadas	248
6.3.2.2.1. Datos de entrada al modelo	248
6.3.2.2.2. Curvas de calidad de estación	248
6.3.2.2.3. Relación altura-diámetro generalizada	250
6.3.2.2.4. Función de perfil y estimación del volumen del	250

árbol	
6.3.2.2.5. Distribuciones diamétricas	252
6.3.2.2.6. Diámetro medio cuadrático	254
6.3.2.2.7. Relación altura media-altura dominante	255
6.3.2.2.8. Relación número de pies-altura dominante	256
6.3.2.3. Estructura del modelo estático con desagregación por clases diamétricas	261
6.3.2.3.1. Esquema del modelo	262
6.3.3. Ejemplo práctico de aplicación del modelo: evolución para un esquema de claras	264
6.3.4. Conclusiones	266
 6.5. BIBLIOGRAFÍA	 268
 7. CONCLUSIONES	 274

RESUMEN

Con este estudio se pretende profundizar en el conocimiento de las masas naturales de *Pinus halepensis* Mill. presentes en la zona del Valle medio del Ebro estableciendo algunas herramientas imprescindibles para su adecuada gestión selvícola. Éstas servirán de base para la futura ordenación de las mismas, de tal forma que se pueda alcanzar el objetivo principal y concreto que debe marcar su gestión, que es la búsqueda de su persistencia mediante la regeneración natural, sin intervención del incendio forestal, y empleando las herramientas que la selvicultura nos ofrece. Además ayudarán a alcanzar el segundo objetivo concreto que se plantea, que es el mantenimiento y ampliación del máximo de utilidades y la consecución de un rendimiento sostenido que permita el establecimiento y la ejecución de la selvicultura necesaria sin necesidad de inversión pública externa al monte.

La zona de estudio corresponde a dos amplias zonas cubiertas por masas naturales de *Pinus halepensis*, denominadas respectivamente "Grupo de montes de Zuera y Castejón de Valdejasa" y "Sierra de Alcubierre". Ambas zonas están incluidas dentro del Valle medio del Ebro y pertenecen simultáneamente a las provincias de Huesca y Zaragoza, ocupando una superficie total aproximada de 40.000 hectáreas.

En primer lugar, se ha realizado un somero repaso de las características botánicas, ecológicas y selvícolas de la especie, tanto a un nivel general como particularizado para la zona de estudio, incidiendo en este caso en algunos aspectos que pueden ser más relevantes, como es la ocurrencia de incendios forestales.

Los datos utilizados proceden de un inventario forestal realizado en 924 parcelas, en el año 2001, y del apeo, en el año 2004, de 111 árboles.

Como herramientas necesarias para sentar las bases de una selvicultura apropiada a estas masas se ha obtenido una relación altura-diámetro generalizada, resultando el modelo de Sloboda *et al.* (1993) Mod. el más adecuado. También se ha demostrado que la función de Weibull permite modelizar las distribuciones diamétricas. Además, se ha seleccionado el modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995) como la función más indicada para definir el perfil del tronco y construir una tarifa de cubicación con clasificación de productos. En estos casos los análisis se han realizado tanto para el conjunto total de datos de forma combinada como para el conjunto de datos de cada una de las zonas por separado

(Alcubierre y Zuera) con objeto de poder comprobar si existían diferencias entre las dos zonas estudiadas.

Por otra parte, se ha elaborado un sistema de calidad para la masa y se ha comparado con otras curvas de calidad existentes para la especie. El modelo elegido para representar la calidad ha sido el de Hossfeld IV (cit. en Kiviste et al., 2002). Se han establecido tres calidades, correspondientes a 6, 10 y 14 metros de altura dominante a los 60 años, suficientes para clasificar la zona de estudio, dada su baja productividad.

Finalmente, una vez obtenidas las anteriores ecuaciones que relacionan diferentes variables, tanto de árbol como de parcela, y aunque todas ellas tienen aplicación directa en la gestión forestal, se han realizado unos modelos compilatorios que permiten aglutinar todas ellas. De esta manera se facilita a los gestores su aplicación práctica. Se ha realizado un diagrama de manejo de la densidad y un modelo estático de crecimiento con desagregación por clases diamétricas. Con el diagrama de manejo de la densidad el objetivo que se pretende es crear una herramienta de sencillo uso para la gestión y clareo de las masas en función de su espaciamiento medio, permitiendo al gestor estimaciones rápidas, incluso en campo. Con el modelo estático de crecimiento con desagregación por clases diamétricas se plantea la obtención de datos más elaborados, permitiendo incluso la estimación de volúmenes con clasificación de productos e incluyendo las distribuciones diamétricas. Así, se consideran ambas herramientas como complementarias, la primera más ágil y rápida y la segunda más elaborada. Por último, se incluyen algunos ejemplos de aplicación de ambos modelos.

ABSTRACT

The aim of this study is to deepen in the knowledge of the *Pinus halepensis* Mill. natural stands in the Ebro medium valley (northeaster Spain). Some necessary tools are established for a suitable forest management. These tools will be useful for the management projects to be developed in that stands, in order to reach the main objective: guaranteeing their persistence by natural regeneration, without forest fire occurring, and using the new available forest methods. In the other hand, they will help to achieve the second and third specific objectives established. These are the maintenance - and the increasing - of the maximum of utilities and obtaining a sustained yield that allows the implementation of the required forestry without public external investment on the forest.

The study area is divided into two wide areas of natural forest of *Pinus halepensis*, called respectively "Grupo de montes de Zuera and Castejón de Valdejasa". Both zones are included inside the Ebro medium valley located in the Huesca and Zaragoza provinces and occupying a total of circa 40.000 hectares.

Firstly, a shallow review of the botanical, ecological and silvics of the species has been carried out. More precisely, and focussing in the study area, the more relevant aspects have been considered like the forest fires occurrence.

Data analyzed come from a forest inventory carried out in 924 plots, in 2001, and from 111 selected trees cut in 2004.

As an essential tool for establishing the bases of a suitable forestry in this area, a generalized relationship height-diameter has been obtained. The Sloboda *et al.* (1993) model was the most appropriate. Furthermore, the Weibull function modelled very accurately the diameter distribution. Also, the exponential model from Riemer *et al.* (1995) has been selected as the most suitable function to define the stem taper function and the merchantable volume equation with products classification. Analyses have been carried out for the global data and separately by zones (Alcubierre and Zuera) in order to check the possible differences existing between the two studied areas.

On the other hand, a site index model has been developed for the study area and it has been compared with other present site index curves for the species. The selected model for characterizing the quality has been the Hossfeld IV (in Kiviste *et al.*, 2002). Moreover, only three quality curves (6, 10 and 14 m at 60 years) were enough for classifying all the studied area due to the low production of these woods.

Finally, after obtaining the above equations relating several individual tree and stand variables, and even though all of them have direct application in forest management, some compiling models have been carried out for combining all them and for fostering the practical implementation of them. A stand density management diagram and a static model of growth by diameter classes have been made as well. The stand density management diagram is a very easy and practical tool for the management and thinning planning based on stand density, allowing quick estimations even in field. The static model of growth by diameter classes offers more elaborated data, providing the estimation of the volume from different classified products and the diameter distribution. Both tools

are considered complementary being the first one more agile and fast and the second more elaborated.

Lastly, some practical examples of both models are included.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación y objetivos

La función prioritaria de las masas de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en el valle del Ebro es la protección o la restauración de la cubierta forestal, debido a que la frugalidad de esta especie le permite vivir en condiciones de clima y suelo donde prácticamente no se encuentra ninguna otra especie arbórea. Sin embargo, también es muy importante el valor social que estas masas brindan a la sociedad (paisaje, recreo, etc.). Además, la obtención de productos tangibles (madera, setas, etc.) en las masas de esta especie no es desdeñable, y en ocasiones es importante, aunque siempre se encuentra supeditada a las utilidades ambientales y sociales, como ocurre en los montes objeto de esta tesis.

Uno de los principios fundamentales que ha perseguido la ordenación de montes desde sus inicios ha sido la persistencia (junto con la estabilidad y mejora) de las masas forestales, independientemente de la función prioritaria que se les hubiera asignado (Madrigal, 1994). Este principio representa la mejor garantía de conservación a largo plazo del espacio forestal, y por lo tanto convierte a la ordenación forestal en el instrumento de planificación óptimo para la gestión de espacios forestales, cualquiera que sean sus objetivos, desde los más tradicionales productores de madera y otros productos tangibles hasta los más actuales de conservación de hábitats y especies dentro de la Red Natura 2000, o la salvaguarda de la continuidad de la vida en el planeta (productos renovables, sumidero de gases de efecto invernadero, etc.), pasando por los obvios de protección frente a la erosión .

De esta manera, la planificación forestal es la única vía que puede asegurar el flujo de bienes y servicios que genera el monte de forma continuada y sostenible para, de esta forma, promover además de la conservación de la naturaleza el desarrollo socioeconómico del medio rural y el ocio de la población urbana.

Por tanto, la optimización de la gestión en estos montes hace necesaria una adecuada planificación de las actuaciones selvícolas, que siempre deben buscar una armonización de los aspectos ambientales, sociales y económicos, que son los tres pilares en los que se basa la gestión forestal sostenible. Para ello, resulta imprescindible adquirir un conocimiento preciso de la estructura y de las relaciones entre las principales variables dasométricas de

dichas masas, que deben servir de herramienta o de base para sustentar la toma de decisiones en la planificación de cualquier actuación sobre las mismas.

Existen excepcionales trabajos en España sobre diferentes aspectos de la selvicultura de *Pinus halepensis* (Pita, 1965; Erviti, 1991; Montero et al., 2001) pero todos ellos referidos a escala nacional, empleando las mismas 72 parcelas permanentes que mantiene el INIA. Gandullo *et al.* (1972) consideran necesarios estudios de la especie en ámbitos geográficos más restringidos que permitan reducir la variabilidad genética, ya que creen que factores de índole genético, que ellos no tuvieron en cuenta, podrían explicar la variabilidad del índice de calidad realizado por Pita (1965). Por todo ello se ha considerado adecuado profundizar en el conocimiento de una zona más reducida del área de distribución de la especie. Concretamente se trata de una amplia zona dentro de la Región de procedencia 6. Monegros-Depresión del Ebro, según la clasificación realizada Gil *et al.* (1996) para esta especie. Esta Región representa probablemente la peor, o una de las peores zonas, por sus condiciones climáticas, para *Pinus halepensis*.

Por estas razones, el objetivo principal de esta tesis es aumentar el conocimiento de las masas de *Pinus halepensis* del Valle del Ebro, sentando así las bases y herramientas necesarias para su gestión sostenible, que permita la consecución del principio prioritario de persistencia de la masa, asegurando el máximo de utilidades, tanto económicas como sociales y ambientales, y sin la intervención de perturbaciones castrotróficas, tanto naturales como antrópicas. Para desarrollar este objetivo global se plantean a priori los siguientes objetivos parciales o concretos:

1.- Obtención de una relación altura-diámetro generalizada

Se van a probar diferentes funciones de las relacionadas en bibliografía y más utilizadas, determinando cuál o cuáles se ajustan mejor a los datos obtenidos en campo, mediante los correspondientes procedimientos de ajuste estadístico y de comparación entre modelos.

2.- Caracterización y ajuste de modelos de distribución diamétrica

Se van a caracterizar y modelizar las distribuciones diamétricas de las masas, mediante la conocida función de Weibull, que es la que mejores resultados proporciona en los trabajos de este tipo.

3.- Elaboración de una tarifa de volumen con clasificación de productos a partir de una función de perfil del tronco

Con los datos obtenidos de árboles apeados se van a probar diferentes funciones de perfil del tronco, y mediante el empleo de estadísticos de comparación y procedimientos gráficos se va a seleccionar aquella función que proporcione mejores resultados. A partir de la función seleccionada se construirá una tarifa de cubicación con clasificación de productos, que permitirá obtener el volumen comercial de la masa.

4.- Elaboración de un sistema de calidad de la estación

A partir de los datos del inventario existente y de la ampliación de datos que se ha realizado, se van a ajustar unas curvas de calidad de la estación para estas masas. Esas curvas permitirán determinar, con una misma ecuación, el crecimiento en altura dominante para un índice de sitio determinado y el índice de sitio para la altura dominante a una edad cualquiera. Las curvas de calidad de estación generadas se van a comparar con otras existentes para esta especie, tanto en España como en otros países.

5.- Elaboración de diagramas de manejo de densidad

Se va a elaborar un diagrama de manejo de la densidad, según la metodología de Barrio y Álvarez González (2005) con objeto de establecer una herramienta para la gestión de las masas de pino carrasco estudiadas en función de su espaciamiento medio. Dicho diagrama permitirá al gestor estimaciones rápidas de producción y otras variables dasométricas importantes, incluso en campo.

6.- Elaboración de un modelo estático de crecimiento y producción en volumen

Puesto que sólo se dispone de una única medición de parcelas de inventario, el modelo de crecimiento y producción a desarrollar será un modelo estático de masa. La metodología a seguir para su desarrollo será similar a la empleada por otros autores (Burk y Burkhart, 1984; Cao *et al.*, 1982; Knoebel *et al.*, 1986; Uribe, 1997; Kotze, 2003).

Una vez obtenidas las distintas funciones y modelos que relacionan diferentes variables, tanto de árbol como de masa, se van a integrar para construir un modelo que permita

hacer estimaciones y predicciones de la producción y el crecimiento de las masas de esta especie. Para la mejor comprensión de su estructura y funcionamiento se presentará un ejemplo práctico de aplicación.

1.2. El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.)

1.2.1. Descripción botánica

Ceballos y Ruiz de la Torre (1971) describen al pino carrasco como un árbol mediano que alcanza los 22 metros de altura en buenas condiciones, estando influenciados la talla y el porte por las condiciones adversas en las que habitualmente vegeta. Su corteza es blanquecina, cenicienta o plateada en los árboles jóvenes y en las ramas, tomando coloración oscura más tarde, sobre todo en la base del tronco. La copa, primero globosa-apuntada o piramidal, se extiende y abre hacia los 20 años, tomando un contorno lobulado, sinuoso e irregular, y es siempre clara y luminosa debido a la escasa persistencia del follaje. Las ramas son delgadas y muy alargadas, horizontales las inferiores y las restantes erecto-patentes. Los ramillos son generalmente uninodales, aunque en climas suaves son frecuentes los multinodales, con metidas en primavera y en otoño. Las yemas son cilíndrico-redondeadas, no resinosas, recubiertas de escamas pardo-rojizas, con pestañas blancas en las márgenes. Las acículas son finas y flexibles, de color verde claro, de 6-12 cm de longitud, aguzadas en el ápice pero no punzantes, siendo las más blandas y delgadas de los pinos peninsulares. Aparecen normalmente envainadas por dos, excepcionalmente por tres o cinco, y agolpadas densamente en el extremo de los ramillos, persistiendo en el árbol poco más de dos años, siendo las de menor duración entre los pinos españoles. Las flores masculinas son oblongas, obtusas y amarillentas, y se encuentran agrupadas en espigas cilíndricas de 5-8 cm. Los conos floríferos femeninos aparecen aislados, apareados o verticilados, son de color verde rosado, de 10-12 mm y erectos sobre pedúnculos largos. Las piñas son aovado-cónicas, alargadas, de 6-12 cm, con apófisis casi planas y ombligos romos y grisáceos. Los piñones tienen un color gris-negruzco, de 5-7 mm, con ala de triple longitud de color pardo clara. El pino carrasco florece de marzo a mayo, según las localidades, madurando las piñas al final del segundo verano y teniendo lugar la dihesencia y diseminación a los dos años de la floración. Las piñas persisten varios años sobre el árbol, viéndose con gran abundancia en la copa, lo que constituye un buen carácter distintivo de la especie. Suele dar buena cosecha todos los años, salvo en zonas de gran aridez, donde la diseminación abundante no es regular. El porcentaje de piñas serótinas varía entre regiones de procedencia siendo, p.ej., muy alto en los Monegros (Gil *et al.*, 1996). La madera de esta especie es muy clara, de grano fino, tenaz

y elástica, muy resinosa, muy dura y semipesada (densidad 0,54 g/cm³). Entre los pinos españoles es de crecimiento longitudinal relativamente rápido, pero de escasa producción volumétrica. Su longevidad es reducida, pudiendo vivir 200 ó 250 años, aunque no suele pasar de 150-180. Nahal (1962) le atribuye una longevidad media de 120 a 130 años, sin sobrepasar los 150.

1.2.2. Distribución y características ecológicas

Herranz (2000) recopila las características generales del pino carrasco, describiéndolo como la especie de su género más ampliamente distribuida por toda el área mediterránea. Los pinares más extensos se encuentran en el norte de África, principalmente en Argelia, y en la Península Ibérica, y también hay buenas manifestaciones en Provenza (Francia), Grecia y Marruecos, siendo escaso en Italia y presentando poblaciones dispersas en Siria (de donde procede el nombre científico, concretamente de la localidad de Aleppo), Líbano, Israel y Jordania.

Los pinares de pino carrasco ocupan una banda altitudinal muy amplia, ya que el gradiente latitudinal también lo es (32°-46°), apareciendo desde el nivel del mar hasta, de forma marginal, los 1.600 m en el Atlas sahariano y en las montañas del sur de España. Dentro de este rango ocupa principalmente las zonas basales xerotérmicas y de altitudes medias, con un óptimo de distribución por debajo de los 800 m de altitud (Blanco *et al.*, 1997).

Se trata de una especie heliófila, termófila y xerófila, perfectamente adaptada a la sequía, siendo el árbol más representativo de las zonas semiáridas mediterráneas, llegando a soportar 250 mm de precipitación anual y períodos secos estivales de 1 a 5 meses.

Esta especie presenta en la Península Ibérica la mayor amplitud climática de toda su área de distribución, alcanzando desde el ambiente semiárido de las zonas basales surorientales a las de tipo submediterráneo característico de la media montaña del Sistema Ibérico y los Pirineos.

Según Herranz (2000), en la Península Ibérica las zonas más áridas de su área reciben entre 250-350 mm anuales (Valle central del Ebro, sureste, algunas Sierras Béticas), en la mayor parte de su territorio entre 350-500 mm anuales, y en determinados enclaves de la parte oriental de Cataluña y de la Sierra de Cazorla se pueden superar los 700 mm, dando lugar

a las mejores masas españolas de pino carrasco. Blanco *et al.* (1997) insisten en el hecho de que es la especie arbórea mejor adaptada a la sequía, llegando a soportar 150 mm, como sucede en la sierra de Cartagena, donde convive con la población relictiva de *Tetraclinis articulata*, no siendo la precipitación un factor determinante en su distribución.

El factor determinante de su distribución parece ser la temperatura mínima invernal, por lo que su presencia se limita a zonas en las que la media de las mínimas del mes más frío es superior a - 3°C, las medias anuales están comprendidas entre 12-16 °C y las del mes más cálido entre 18-26 °C (Gil *et al.*, 1996).

El 90% de las masas de *Pinus halepensis* se halla sobre suelos calizos, por lo que tradicionalmente se ha considerado especie "calcícola", pero puede vivir también sobre sustratos silíceos como rodenos, pizarras blandas, cuarcitas, granitos y rañas. Es capaz de colonizar sustratos margosos y calcáreo-margosos, en ocasiones con alto contenido en yeso, areniscas y arcillas. También puede establecerse sobre los afloramientos de peridotitas y dolomías del sur de la península, rocas con elevada concentración de magnesio que originan suelos pobres en nutrientes tolerables por coníferas xerófilas, así como sobre suelos esqueléticos y muy secos, colonizando arenales costeros y sustratos móviles de difícil edafización. Sin embargo, no se aviene a vivir en suelos salinizados y tolera mal los sustratos compactos o con contenidos muy altos en arcillas y los permanentemente encharcados (Ceballos y Ruiz de la Torre, 1971; Gil *et al.*, 1996; Blanco *et al.*, 1997).

El estrato arbóreo suele tener estructura de bosque semiabierto de 10-15 m de talla con abundantes claros. El pino carrasco forma masas monoespecíficas cuando coloniza suelos incendiados o cultivos abandonados, o bien en enclaves muy áridos o en aquéllos donde las condiciones edáficas impiden la instalación de otros árboles más exigentes.

Con frondosas la mezcla más frecuente es con encina (*Quercus rotundifolia*), que aparece en zonas frescas del litoral mediterráneo y de pinares continentales. En enclaves ácidos, térmicos y húmedos de Cataluña, Castellón y Valencia se mezcla con alcornoque (*Quercus suber*), en zonas del Sureste y Levante con acebuche (*Olea europaea*), y en umbrías frescas de la Alcarria con quejigo (*Quercus faginea*).

Las mezclas con coníferas están muy extendidas: con *Abies pinsapo* en la sierra de Las Nieves, con *Tetraclinis articulata* en Cartagena, con *Juniperus thurifera* en los Monegros, con *Juniperus phoenicea* y/o *Juniperus oxycedrus* en Levante y sureste, con *Pinus pinea* en Cataluña, Alicante, Valle del Júcar (Cuenca, Albacete) y Andalucía (Granada y Almería),

con *Pinus pinaster* en el macizo del Caroch, Cazorla y Sierras Béticas orientales, con *Pinus nigra* en la Alcarria, Serranía de Cuenca y Sierras Béticas, y con *Pinus sylvestris* en el Prepirineo catalán, Maestrazgo y Puertos de Beceite.

Citando a Ozenda (1975) se trata de una especie espontánea y ampliamente distribuida en el ámbito mediterráneo, que participa en diversas comunidades con significados dinámicos variados y que puede llegar a formar bosques climácicos en las zonas basales térmicas de la cuenca mediterránea. Así mismo, se le reconoce el carácter climácico en obras de ámbito más local publicadas en Provenza (Francia), Grecia, Siria, Marruecos y España.

Gil *et al.* (1996) indican que varios geobotánicos españoles de la primera mitad del siglo XX le reconocen su papel de vegetación potencial en zonas como los Monegros, Valle del Ebro, Sierra de Mágina o enclaves degradados de la mitad oriental de la Península, carácter que también le ha sido reconocido en publicaciones más recientes. Blanco *et al.* (1997) consideran que puede dar lugar a formaciones potenciales en zonas basales donde la sequía estival es muy acentuada, las precipitaciones anuales escasas y los sustratos en numerosas ocasiones limitantes por darse determinadas condiciones edáficas, litológicas o geomorfológicas.

No obstante, Herranz (2000) considera que la mayoría de las veces los pinares de carrasco han sido sistemáticamente ignorados en la literatura fitosociológica española de la segunda mitad del siglo XX, alegando, casi siempre sin pruebas, que tenían su origen en repoblaciones artificiales o que se habían extendido a consecuencia de la destrucción antrópica de los bosques de frondosas. Gil *et al.* (1996) aportan gran cantidad de evidencias paleobotánicas e históricas que confirman el carácter indígena de los pinares de carrasco en la Península Ibérica, ya que provienen de épocas en las que el hombre carecía de medios poderosos para alterar en gran medida el paisaje vegetal y en las que no se habían iniciado todavía las labores de repoblación a gran escala.

Blanco *et al.* (1997) distinguen distintos tipos de pinares de pino carrasco, entre ellos los de zonas basales de ambiente semiárido, entre los que se encuentran parte de los pinares objeto de esta tesis, describiendo sus características ecológicas, fundamentalmente el cortejo florístico que acompaña a este pino. Concretamente, para estas zonas semiáridas indican que el pino tiene un desarrollo moderado y que aparece disperso sobre un estrato arbustivo más o menos denso, sin llegar a definir nunca una estructura de bosque cerrado. En estas condiciones tan limitantes las frondosas perennifolias no les plantean problemas de competencia importantes y son ellas mismas las que se desarrollan con cierta dificultad,

predominando los portes raquíticos y retorcidos. Dichos autores también ponen de manifiesto que, en zonas muy humanizadas, puede ser complicado determinar si las masas constituyen etapas seriales de pino carrasco, o el aspecto aclarado y de escaso desarrollo de los pinares podría deberse a una larga e intensa destrucción de lo que en el pasado fueron bosques bien desarrollados. Explican cómo en la depresión del Ebro, zona de marcada aridez climática, se producen inversiones térmicas que provocan la retirada de especies más termófilas a lugares más elevados; esto ocurre con los pinares de pino carrasco que aparecen predominantemente en lo alto de los cabezos y en las partes más elevadas de las sierras circundantes, donde las mínimas invernales de temperatura son menos extremas, mientras que el sabinar de *Juniperus thurifera* se instala en el fondo de los valles, aunque ambas formaciones suelen contactar en las laderas. Estos pinares con coscoja (*Quercus coccifera*) se localizan aproximadamente en un rango altitudinal de 400-800 m y ocupan sustratos constituidos por calizas margosas y yesos, cuyas condiciones limitantes determinan la estructura aclarada del sotobosque, que está constituido por especies bastante termófilas, entre las que predominan el lentisco (*Pistacia lentiscus*), el espino negro (*Rhamnus lycioides*), el aladierno (*Rhamnus alaternus*), el labiérnago (*Phillyrea angustifolia*), el romero (*Rosmarinus officinalis*), la aliaga (*Genista scorpius*), la romerina (*Cistus clussi*), la estepa blanca (*Cistus albidus*) y la bufalaga (*Thymelaea tinctoria*), siendo frecuentes los ejemplares dispersos de sabina negral (*Juniperus phoenicea*), enebro de la miera (*Juniperus oxycedrus*) y sabina albar (*Juniperus thurifera*), mientras que el estrato herbáceo está dominado por fenal (*Brachypodium retosum*), apareciendo con cierta frecuencia la raspalengua (*Rubia peregrina*).

1.2.3. Superficie e importancia económica de *Pinus halepensis* en España y Aragón

En España, las masas naturales de pino carrasco ocupan 805.953 ha (Ortuño y Ceballos, 1977), lo que representa casi un 7% de la superficie forestal arbolada (Herranz, 2000). Abunda en el litoral mediterráneo (Cataluña, Comunidad Valenciana, Murcia, Andalucía Oriental, Baleares), y remonta el Valle del Ebro hasta Álava. Se adentra por Albacete, Jaén, Cuenca y Guadalajara, desbordando la vertiente mediterránea en los valles altos de los ríos Tajo, Guadiana y Guadalquivir (Herranz, 2000).

Entre 1940-1980 se repoblaron con *Pinus halepensis* 452.839 ha (Abelló, 1988), lo que supuso el 15,5% de las repoblaciones de ese período, siendo Aragón una de las regiones donde mayor superficie se plantó con esta especie, junto con Andalucía Oriental, la Comunidad Valenciana y Murcia (Herranz, 2000).

Cámara (2001) indica que las masas naturales de pino carrasco en España cubren entre 800.000 y 900.000 ha, lo que supone aproximadamente un tercio del total mundial de su área natural (3,5 millones de ha), y las repobladas 300.000 ha.

El Segundo Inventario Forestal Nacional (Cervera, 1996) da para *Pinus halepensis*, sin distinguir entre masas naturales y artificiales, una superficie de 81.722 ha en Zaragoza, 77.169 en Teruel y 27.617 en Huesca, siendo destacables las 30.312 ha, 49.248 ha y 10.030 ha, respectivamente, de propiedad particular, sin consorcios, mientras que el resto estaría bajo gestión de la Diputación General de Aragón. Estas superficies representan respectivamente el 41,4 % del total de la superficie forestal arbolada de Zaragoza, el 19,0% en Teruel y el 14,0% en Huesca. Para el conjunto de Aragón supone un total de 186.508 ha y representa el 18,8 % de la superficie forestal arbolada.

El Primer Inventario Forestal Nacional (MAPA, 1969) daba para Zaragoza 82.814 ha de *Pinus halepensis*, de las cuales incluía como repoblaciones 53.609 ha, e indicaba que se contaban 11.122 ha de repoblaciones realizadas por el Patrimonio Forestal entre 1956-1965. Para Huesca daba 31.512 ha, de las cuales 21.391 correspondían a repoblaciones (MAPA, 1970), y 53.702 ha en Teruel.

La estadística forestal de España de 1960 (MA, 1960) asignaba a Zaragoza una superficie de *Pinus halepensis* de 68.319 ha, a Huesca 21.651 y a Teruel 32.101, lo cual representaría para la Comunidad de Aragón el 13,6% de la superficie de esta especie en España. La superficie de pino carrasco respecto al total de coníferas suponía el 19,2% a nivel nacional, mientras que en Zaragoza, Huesca y Teruel, representaba el 53,7%, 6,5% y 17,4%, respectivamente, del total de la superficie de coníferas en cada provincia. Respecto del total de superficie arbolada, representaba el 7,7% para el conjunto de España, y el 29,5%, el 3,6% y el 10% en cada una de las provincias citadas, respectivamente.

Del análisis del Mapa Forestal de Aragón (DGA, 2000), se deduce que las masas de *Pinus halepensis* en el conjunto de la Comunidad Autónoma de Aragón representarían una superficie de 225.820 ha, de las cuales 68.468 serían repobladas y el resto de carácter natural. La zona de estudio representa un total de 36.047 ha de masas naturales, correspondiendo 15.352 a la zona de Alcubierre y 20.695 a la de Zuera. En cuanto a repoblaciones suponen tan solo 1.848 ha, de las que 530 se encuentran en la zona de Alcubierre y 1.318 en la de Zuera. Así, las masas naturales objeto de estudio representan un 23% del total de las masas naturales de la Comunidad. Se ha excluido del estudio la superficie en regeneración de la zona de Zuera correspondiente a un incendio forestal ocurrido en 1995, que alcanzó una superficie forestal de 3.100 hectáreas.

La función principal que brindan las masas de esta especie es la protección ecológica, quedando en un segundo término la producción, que en general es muy baja (Alía *et al.*, 2000). Sin embargo, sus aprovechamientos maderables no tienen porqué ser despreciables a escala local, máxime si se consideran como complementarios de otros usos como el pascícola, cinegético, recreativo, micológico, etc. Aunque la madera de pino carrasco, por su baja productividad en general, ha sido de las menos estudiadas de las coníferas españolas, esta especie ha participado en el desarrollo de algunas comarcas españolas de forma crucial, bien por su madera o también por su resina (García y De Palacios, 2000), caso este último de la zona de estudio en el pasado.

Ceballos y Ruiz de la Torre (1971), al describir los usos de la madera de *Pinus halepensis*, dicen que es buena para calefacción, cajerío y traviesas de ferrocarril, pero que su dureza y riqueza en resina limitan su utilización en carpintería y la forma tortuosa de sus fustes hace que sea poco usada en la construcción, salvo la de buenas estaciones y rodales más densos. Sus leñas se han empleado para calefacción en las zonas de su área donde falta o escasea la encina. También indican que es el pino que más se resina después de *P. pinaster*, y que en otros tiempos se extraía pez destilando las cepas. Destacan además el importante papel de esta especie en aspectos ornamentales y socio-recreativos, tanto por ser una de las especies fundamentales del jardín mediterráneo como por poder constituir bosques naturales o artificiales hasta la vecindad del mar y en las sierras de las zonas más áridas y deforestadas. Igualmente, subrayan su valor como especie protectora, ya que su rusticidad y sobriedad le permiten ser instalado en las condiciones más adversas, aunque tiene en contra los defectos de formar poco humus y ser muy inflamable.

Centrándose en el ámbito productivo maderable, se han analizado las cortas en metros cúbicos de madera de *Pinus halepensis* de 1963 a 2001 con los datos disponibles procedentes de la estadística forestal nacional (MA, 1965, 1966, 1967, 1970, 1971; MAPA, 1974, 1975, 1995, 1996, 1997, 1998, 2002, 2003), resultando que las cortas de esta especie representan como media del período un 7% del total de cortas de coníferas en España. Puede observarse en la Figura 1.1 una evolución creciente de las cortas hasta finales de la década de los ochenta, para iniciar entonces un declive que continúa hasta la actualidad.

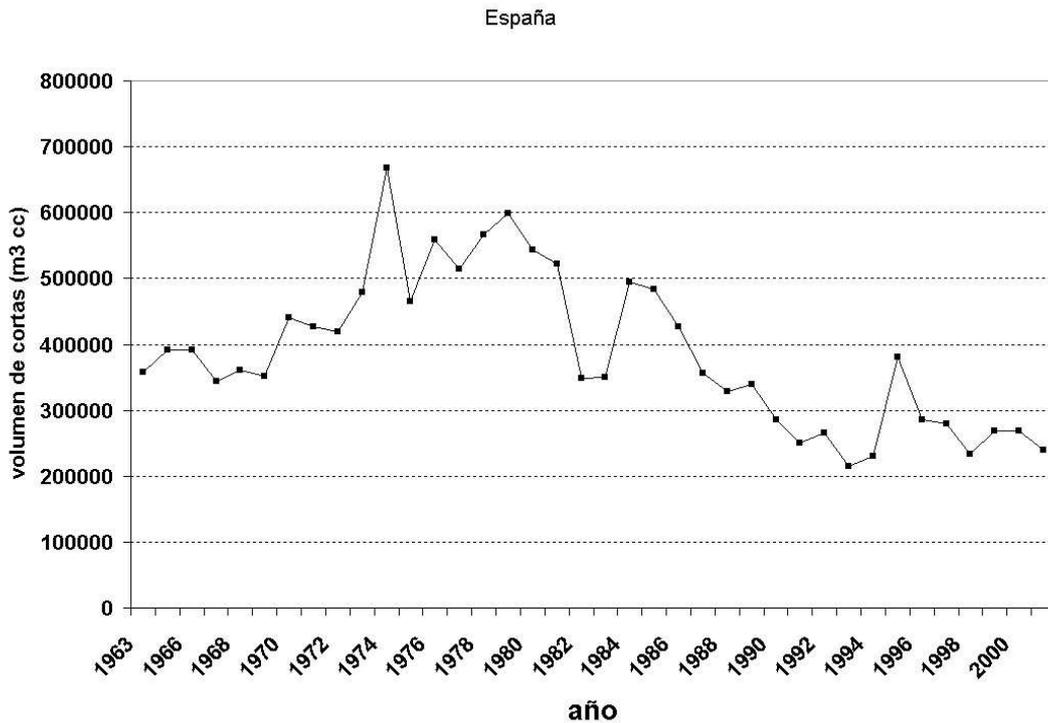


Figura 1.1. Evolución nacional de las cortas de madera (m³) de *Pinus halepensis*.

No obstante, la producción de esta especie puede quedar algo infravalorada, dado que es frecuente que numerosas cortas de madera se clasifiquen como leñas debido a la escasa dimensión de los productos obtenidos, dato que no está especificado por especie en la estadística referida.

Las cortas de pino carrasco en Aragón suponen, a su vez, un 6% del total nacional para la especie, siendo la provincia de Teruel la más productiva, con un 66% del total de cortas en Aragón, seguida de Zaragoza con un 28 % y Huesca con sólo el 6%.

En la Figura 1.2 puede apreciarse un comportamiento cíclico en la cortas de madera de la especie por provincias, con períodos de subida y bajada, con una clara tendencia a la baja para Teruel en el último período y, sin embargo, un remonte importante para Zaragoza, que después cae en picado.

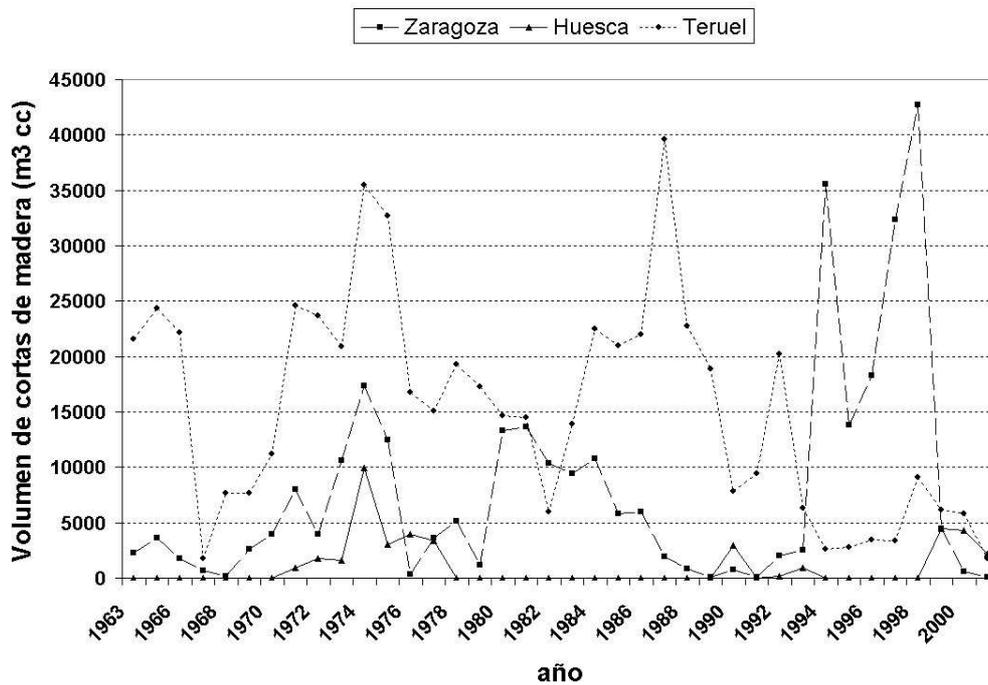


Figura 1.2. Evolución de las cortas de madera (m³) de *Pinus halepensis* por provincia en la Comunidad Autónoma de Aragón.

En la Figura 1.3 se ha representado la evolución del valor de las cortas de madera tanto para *Pinus halepensis* como para el total de coníferas, desde 1974 hasta 2001, a nivel nacional. Los valores se han actualizado con el I.P.C. general, ya que no se disponía del valor del interés legal del dinero para toda la serie de años, a diciembre de 2003. Puede observarse una clara tendencia a la baja para el valor de las cortas de *Pinus halepensis*, mientras que para el total de coníferas se aprecia un comportamiento cíclico de subidas y bajadas, pero manteniéndose el valor.

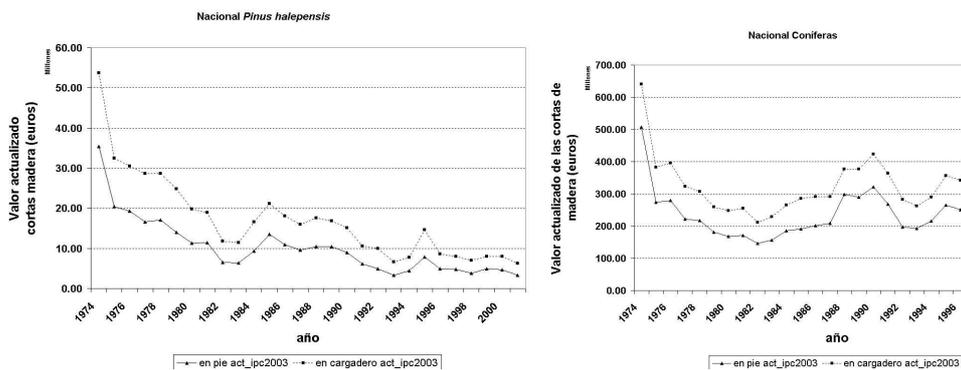


Figura 1.3. Evolución del valor de las cortas de madera de *Pinus halepensis* y del total de coníferas a nivel nacional.

En la Figura 1.4 se ha representado la evolución del precio, también actualizado con el I.P.C., de la madera de *Pinus halepensis*, observándose una ligera tendencia a la baja.

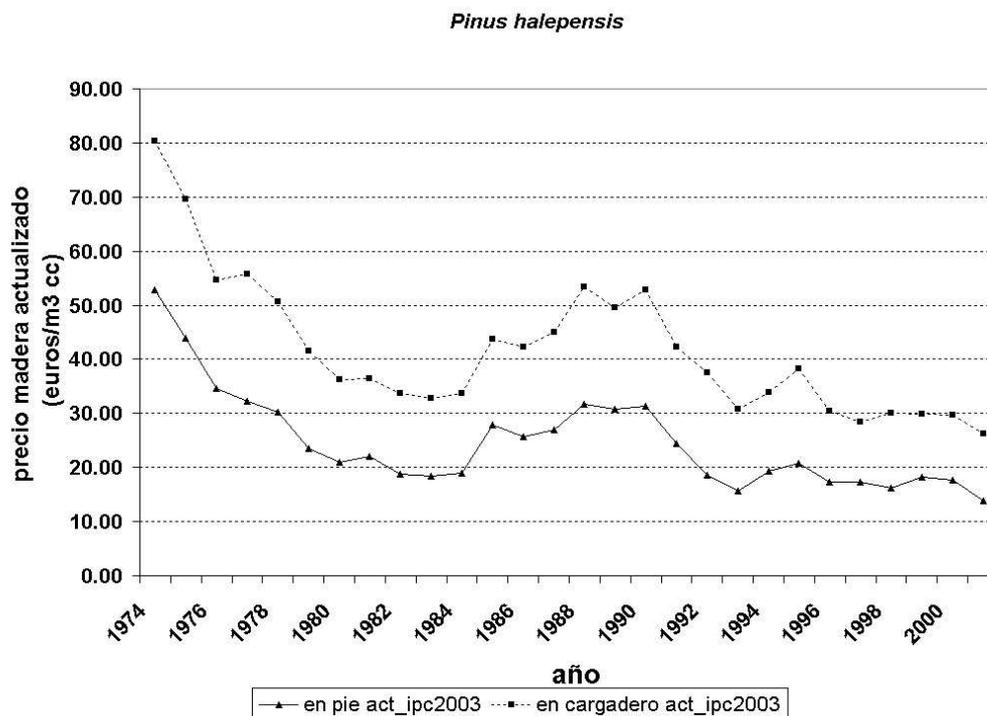


Figura 1.4. Evolución del precio de la madera de *Pinus halepensis*, en pie y en cargadero.

1.2.4. Algunas generalidades para la silvicultura de la especie

En este apartado no se pretende describir de forma pormenorizada la silvicultura de la especie, *Pinus halepensis*, sino resaltar algunos aspectos ecológicos que no deben olvidarse al abordar cualquier actuación selvícola en sus masas.

Como ya se ha comentado, entre las funciones de estas masas se pueden destacar, de forma resumida, las siguientes:

- Ecológicas: disminución de la erosión, recarga de acuíferos, conservación de suelos, hábitats, especies de flora y fauna, aumento de la biodiversidad.
- Socioculturales: recreativas, paisajísticas, deportivas, sanitarias.
- Económicas: aprovechamientos maderables, leñosos, cinegéticos, micológicos, pascícolas.

Además, en el nuevo escenario de cambio climático global, estas masas ofrecen un importante potencial en dos aspectos destacados:

- Como reservorios de CO₂.
- Como productoras de biomasa energética sustitutiva de los combustibles fósiles.

Sin embargo, no hay que olvidar que el cambio climático también está produciendo efectos adversos en las masas, concretamente pueden observarse ya los problemas de decaimiento en diversas poblaciones.

En los años ochenta, el continuo y progresivo deterioro del estado de salud de los bosques registrado en Europa suscitó una preocupación general en la sociedad. Para cuantificar los daños e investigar las causas de esta degradación se estableció el Programa de Cooperación Internacional para la Evaluación y Seguimiento de los Efectos de la Contaminación Atmosférica en los Bosques, con una red sistemática internacional de gran escala, en la que se lleva a cabo con periodicidad anual el análisis del estado de salud del arbolado y de los principales factores que actúan negativamente sobre el mismo (MMA, 2006).

Como explican Camarero *et al.* (2004), a lo largo del siglo XX el clima se ha vuelto más cálido y seco en la región mediterránea de la Península Ibérica. Este cambio, sin embargo, no es gradual, sino que se ha visto punteado por sucesivos episodios de sequía, como las de los años 1985 y 1994. En concreto, el verano de 1994 fue extremadamente seco, como culminación de un período de cinco años de déficit hídrico. Según los datos de la Red de seguimiento de daños, las especies arbóreas más afectadas fueron *Pinus sylvestris*, *P. nigra* y *P. pinaster*, mientras que las menos afectadas fueron *Quercus faginea*, *Olea europaea* y *P. pinea*. Dos años después, cuando los niveles de precipitación se habían recuperado, las especies que mantenían un alto grado de afectación en más del 15% de las estaciones eran *P. pinaster*, *P. nigra*, *P. halepensis* y *Q. ilex* (Peñuelas *et al.* 2001).

El informe para 2006 de la Red Europea de seguimiento de daños en los bosques (nivel I) indica para España que se ha detectado un cierto decaimiento y muerte puntual, relacionadas con el déficit hídrico continuado, y sequías puntuales, principalmente en el Levante, Sureste peninsular y en áreas centrales de ambas mesetas. Las especies más afectadas han resultado ser las del género *Quercus* entre las frondosas, y el pino carrasco dentro de las coníferas. En cuanto a las principales causas de desvitalización y decaimiento reseñadas durante el 2006 destacan los daños de origen abiótico, que junto a las fuertes defoliaciones primaverales que puntualmente han afectado a muchas frondosas, y el

continuado incremento del muérdago, agrupan la mayor parte de los síntomas identificados.

Los registros y modelos disponibles también indican que los episodios climáticos extremos se harán cada vez más frecuentes y, por lo tanto, también se pueden esperar cambios bruscos en la vegetación (Camarero *et al.*, 2004).

Así, sólo la diversificación de estructuras y productos, y su utilización eficiente, permitirá conseguir la estabilidad ecológica, económica y social, siendo las tres imprescindibles (San Miguel, 2003).

Por otra parte, el nivel de variación genética de la especie es bajo en comparación a otras especies del mismo género, al tratarse de una especie de colonización reciente. Sin embargo, existen tendencias claras de variación norte-sur y su estructuración en tres grupos principales de procedencias. Esta variación clinal está relacionada con los principales factores ambientales de la especie: aridez y termofilia (Alía *et al.*, 2000).

Pinus halepensis es una especie muy prolífica, con una elevada producción de semilla, que comienza a edades tempranas (Alía *et al.*, 2000; Lavi *et al.*, 2005), dando una buena producción a los 15-20 años, y en la que no se observa un efecto de vecería tan marcado como en otras especies de este género (Alía *et al.*, 2000). Presenta un alto porcentaje de piñas del año cerradas en la copa, entre el 40-80%, que constituyen el banco de semillas de copa, y mantienen su viabilidad al menos durante tres años (Dastalakov y Thanos, 1996).

La producción de semilla varía desde 1,5 hasta 11,8 kg/ha (Alía *et al.*, 1999). Algunos resultados muestran una aceleración en la producción de piñas y viabilidad de la semilla en parcelas tratadas mediante clareo a edades tempranas (De las Heras *et al.*, 2007; González-Ochoa, 2004; Verkaik y Espelta, 2006).

No se ha encontrado bibliografía respecto de la edad a la que la fructificación deja de ser suficiente para asegurar una adecuada regeneración, tanto en producción de piña como en viabilidad de la semilla, aunque los resultados de Dastalakov y Thanos (1996) mostraron, respecto de la viabilidad de las semillas en piñas cerradas, una reducción gradual tanto del porcentaje final como del ratio de germinación en árboles de cuatro a más de 50 años.

En ausencia de perturbación, las semillas maduran en un período de dos años y la dispersión se produce en el tercer año, desde el verano al otoño, justo un poco antes del período de germinación en otoño (Acherar, 1981; Abbas, 1983; Bolós y Vigo, 1984; Laguna, 1993; Skordilis y Thanos, 1997).

Sin embargo, la viabilidad de la semilla dispersada va disminuyendo rápidamente con el tiempo (De Las Heras *et al.*, 1997) y germinan rápidamente después de un corto evento de lluvia (Dastalaková y Thanos, 1996, 2004). En ausencia de fuego, la supervivencia de las plántulas aumenta con la distancia a los adultos por la menor competencia con ellos y con el resto de regenerado, y por una mayor predación cerca de las fuentes de semilla (Nathan *et al.*, 2000; Nathan y Ne'eman, 2004).

Las distancias de dispersión de la semilla son, en general, muy cortas. Acherar *et al.* (1984) encontraron que el 97% de las semillas se dispersaron en un radio de menos de 24 m del árbol, y Broncano (1999) observó que la distancia máxima de dispersión oscila entre 24 y 40 m, que el 50% de las semillas son dispersadas entre 7 y 10 m y que más allá de 100 m no se encontraba ninguna semilla. Unos resultados similares fueron encontrados por Lavi *et al.* (2005), quienes observaron que la invasión de nuevas plantas desde una repoblación se producía en su mayor parte en una distancia de 24 m, y que sólo algunos individuos alcanzaban distancias superiores a 100 m. La distancia máxima de dispersión se puede establecer en torno a los 120 m según Nathan *et al.* (2000), quienes encontraron que el 97% de las semillas fueron atrapadas a una distancia de los árboles adultos inferior a aquella. Para Nathan y Ne'eman (2004), la dispersión de la semilla es inducida por dos factores, por el fuego (piriscencia) y por las condiciones atmosféricas de sequía (xeridiscencia), recorriendo en ambos casos, la mayoría de las semillas, distancias relativamente cortas menores de 30 metros, lo cual contrasta con el factor de xeridiscencia, asociado a fuertes vientos que pueden transportar semillas a distancias de un kilómetro y más.

La clasificación del territorio en distintas clases de idoneidad, en función de su climatología, indica, entre otros aspectos, la capacidad regenerativa de la especie de forma espontánea (Cámara, 2003). De la taxonomía fitoclimática y espectros de idoneidad para *Pinus halepensis*, Cámara (2003) saca algunas conclusiones, de las que se destacan las siguientes por su relevancia para la zona en estudio:

- El pino carrasco pierde poder regenerativo según aumenta la xericidad del medio por encima del óptimo, y las extremas condiciones ambientales dificultan un adecuado desarrollo de la especie, hasta anularlo.
- El espectro indica una aptitud colonizadora que se extiende en sentido descendente desde un óptimo infralítico hasta los umbrales del subdesierto.

- La expresión geográfica de los gradientes de idoneidad apunta a la existencia de dos grandes núcleos peninsulares de idoneidad óptima, siendo uno de ellos el Valle del Ebro.

Por otro lado, *Pinus halepensis* parece participar de rasgos, como la corta longevidad y la pobre poda natural, que favorecen la inflamabilidad e incrementan la probabilidad de fuegos de reemplazamiento de la masa (Vega, 2003). La falta de poda natural y el alto contenido en resina aumenta la probabilidad de fuegos de copa y, en consecuencia, la muerte de los árboles (Ne'eman *et al.*, 2004). Los bosques de esta especie presentan características que facilitan la extensión del incendio y ayudan a que su intensidad sea mayor, como son (Trabaud, 1992):

- La gran cantidad de ramas muertas en la base del árbol, que facilita la propagación del fuego hacia la copa.
- Las acículas, las placas de corteza y las piñas favorecen la formación de fuegos secundario.
- La disposición laxa de la hojarasca permite una rápida propagación del fuego a este nivel.

El pino carrasco ha desarrollado estrategias para adaptarse al fuego (fructificación precoz, retraso de la diseminación y presencia de conos serotinos), que son efectivas si el tiempo transcurrido entre dos fuegos consecutivos es mayor que el necesario para que el pino fructifique, y si se dan buenas condiciones climáticas durante los dos años siguientes al incendio (Herranz, 2000).

Es una especie que regenera a partir de las semillas que se dispersan al abrirse las piñas por efecto de la temperatura (Broncano, 1999). La liberación masiva y sincronizada de semillas, tras incendio, va encaminada a asegurar el relevo de la población (Lamont *et al.*, 1991; Daskalaku y Thanos, 1996). La regeneración tras incendio depende sobre todo del banco de semillas presentes en la copa, y el extremadamente alto pH de la cama de cenizas bajo el árbol quemado constituye el nicho para el establecimiento de la regeneración bajo sus árboles padre (Ne'eman *et al.*, 2004).

Según Broncano (1999) las piñas que no se abren en el incendio difícilmente lo hacen más tarde y, al año del incendio, prácticamente han perdido toda la viabilidad de sus semillas. La viabilidad de las semillas dispersadas en el incendio es nula dos años y medio después, y del 38% al año y medio. Los resultados de Herranz *et al.* (1997), mostraron que la regeneración se consiguió durante los 21 primeros meses tras el incendio.

Por tanto, es una especie que presenta habitualmente una buena regeneración tras incendio (Ciancio, 1986; Tsitsoni, 1997; Broncano, 1999; Vega, 2003), aunque el rango puede ser muy variable al estar influenciado por diversas variables. Por ejemplo, para Pausas *et al.* (2004) varió de 0,006 a 20,4 pies/m². Por su parte, Herranz *et al.* (1997) encontraron que el rango de mortalidad del regenerado, el verano tras la primera regeneración post-incendio, variaba entre el 14,94 y el 47,35%, y la densidad del regenerado disminuía de 0,66 pies/m², nueve meses después del incendio, a 0,24 pies/m², 39 meses tras el mismo. Ciancio (1986) comenta que no es raro encontrar más de 10.000 pies/ha en la regeneración natural tras incendio.

De las conclusiones del Seminario sobre selvicultura de *Pinus halepensis* y *Pinus brutia* (CIHEAM, 1986) se desprende que el fuego no es indispensable para la regeneración y, aunque puede favorecerla dentro de ciertos límites, es la semilla disponible en cantidad suficiente la que permite una adecuada regeneración, sobre un suelo desprovisto de la vegetación preexistente y correctamente trabajado.

La regeneración de una especie es un fenómeno complejo, en el que intervienen numerosos condicionantes, entre los que destacan por su importancia el recubrimiento vegetal del suelo y su receptividad a la semilla (Abbas, 1986; Cabrera, 2003). Estos condicionantes determinan, entre otros, la disponibilidad de luz y de agua para la supervivencia de la semilla, y dan lugar, para la zona septentrional del sudeste francés, a la aparición de un regenerado con frecuencia y vitalidad muy desiguales según las zonas (Abbas, 1986). También para Francia, comenta Bedel (1986) que son ambientes menos favorables para la regeneración las zonas con coscoja, que forman una cubierta demasiado densa. Si las condiciones del suelo no son las óptimas, en especial en cuanto a su cobertura por matorrales y gramíneas, el riesgo de fracaso en la regeneración aumenta radicalmente (Garitacelaya, 2003).

Entre los factores que influyen en la regeneración debe tenerse en cuenta también la posible influencia del cambio climático, ya que, de confirmarse, una aridificación del clima podría suponer la imposibilidad de regeneración en algunas zonas para las especies instaladas (Serrada, 2003).

Este mismo autor (Serrada, 2003) apunta que, a título indicativo, 2.000–2.500 pies/ha puede considerarse una densidad suficiente para la regeneración natural en monte alto de masas regulares, para especies de luz en estaciones medianas.

Para Ciancio (1986), la problemática de estos bosques, y por lo tanto de su selvicultura, es la regeneración por vía natural. Entiende que los tratamientos selvícolas son el elemento indispensable para asegurar el mantenimiento de los equilibrios de la masa en una evolución lenta pero segura. Estas intervenciones deben buscar:

- Un crecimiento progresivo del número de árboles en pie.
- La creación de condiciones bio-ecológicas favorables.
- La regeneración natural.
- La formación de masas puras o mezcladas en una estructura compleja, estable dinámicamente.

Y para programar y poner en práctica el tratamiento adecuado a cada situación es necesario el análisis de datos relevantes y verificar los resultados después de cada operación. El autor anterior aconseja claras fuertes y precoces para llegar a la densidad definitiva entre los 40-60 años, según la calidad de estación.

La selvicultura de este tipo de masas no responde a un tratamiento concreto, y en cada caso debe definirse y modificarse la intensidad de las actuaciones con base a la respuesta de la masa y a la consecución de los objetivos (Alejano *et al.*, 2000).

Para Montero *et al.* (2000), en la práctica, las intervenciones en esta especie deberían hacerse como mínimo cada 15 años, para que resulten económicamente rentables. En masas de alta calidad, este período podría disminuirse en edades jóvenes y alargarse hasta 20 o más años, cuando se apliquen las cortas a masas mayores de 50-60 años.

Desde un punto de vista selvícola y ecológico, las intervenciones deben ser cuidadosas, moderadas y frecuentes, pero desde un punto de vista económico es más recomendable que sean fuertes e infrecuentes. Por lo tanto, la selvicultura práctica debe buscar un compromiso entre estos dos extremos (Montero *et al.*, 2001).

Por otra parte, dentro de las estrategias para la reducción de CO₂ atmosférico, la gestión sostenible de los bosques, mediante la aplicación de estrategias selvícolas adecuadas, debe (Montero *et al.*, 2002):

- Incrementar las existencias de biomasa en pie (p. ej., alargando el turno).
- Ofrecer productos de vida más larga, siendo para ello necesario aumentar la calidad de la madera mediante las intervenciones necesarias.

- Favorecer la regeneración de la masa adelantándose a la naturaleza.
- Prevenir los incendios forestales.

Finalmente, entre los aspectos negativos más importantes derivados de la falta de silvicultura se pueden concretar los siguientes:

- Pérdida del valor añadido que podrían tener los productos con una correcta gestión y estancamiento del crecimiento de la masa por una excesiva competencia.
- Riesgo de propagación de incendios forestales por excesiva acumulación de biomasa.
- Pérdida del potencial como reservorio de CO₂, ya que el balance a largo plazo de un masa forestal no intervenida es cero (Montero *et al.*, 2005).
- Problemas de regeneración por envejecimiento de la masa, haciéndola depender exclusivamente del devenir de los incendios forestales u otras catástrofes naturales.

1.3. Zona de estudio

1.3.1. Situación y propiedad de los terrenos

La toma de los datos necesarios para la realización de este trabajo se llevó a cabo en dos amplias zonas cubiertas por masas naturales de *Pinus halepensis*, denominadas respectivamente “Grupo de montes de Zuera y Castejón de Valdejasa” y “Sierra de Alcubierre”. Ambas zonas están incluidas dentro del Valle medio del Ebro y pertenecen simultáneamente a las provincias de Huesca y Zaragoza, ocupando una superficie total aproximada de 40.000 hectáreas. En la Figura 1.5 se presenta la localización de la zona de estudio.

La zona que se denominará en adelante “Zuera” queda englobada principalmente en los términos municipales de Zuera y Castejón de Valdejasa, y además en los de Sierra de Luna, Las Pedrosas, Tauste, Pradilla de Ebro, Torres de Berrellén y Zaragoza, todos ellos de la provincia de Zaragoza, así como en el término oscense de Gurrea de Gállego.

La de “Alcubierre” comprende, en la provincia de Zaragoza, terrenos pertenecientes a los términos de Perdiguera, Leciñena, Farlete, Monegrillo, Pina de Ebro y La Almolda,

mientras que en la provincia de Huesca se estudian terrenos de Tardienta, Torralba de Aragón, Senés de Alcubierre, Robres, Alcubierre, Lanaja y Castejón de Monegros.

Las masas estudiadas se corresponden en su mayor parte con montes de Utilidad Pública, pertenecientes a los Ayuntamientos de los municipios en los que se encuentran, correspondiendo su gestión al Departamento de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Aragón. Así, en la zona de "Zuera" el 72% de la superficie analizada corresponde a montes de U.P. y el 28% restante son terrenos de propiedad particular, aunque parte de ellos pertenecen también a los Ayuntamientos (montes de Libre Disposición). En la zona de "Alcubierre" el 95% de la superficie corresponde a montes de U.P. y sólo un 5% es de carácter particular, propiedad de un Ayuntamiento (también monte de Libre Disposición).

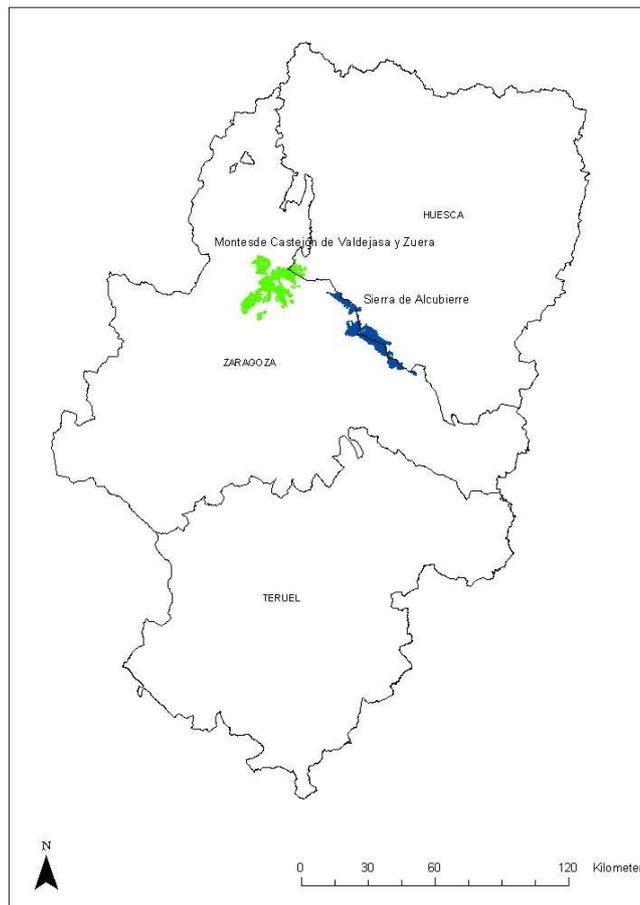


Figura 1.5. Localización de la zona de estudio

1.3.2. Descripción del medio natural

1.3.2.1. Fisiografía

La zona de los montes de Castejón y Zuera posee un relieve elevado con dirección NE-SO. Esta alineación presenta una pendiente general que desciende hacia el sur, con altitudes superiores a los 700 m en la zona norte y próximas a los 600 en el sur, alcanzando sus cotas más altas en los vértices de Lomaza (748 m) y San Esteban (747 m). Estos montes conforman la divisoria de aguas entre las cuencas del Gállego, al este, y el Arba, al oeste. Como consecuencia, a partir de los relieves centrales se originan sendas redes de drenaje con direcciones S y SE y O respectivamente. En la zona oriental los principales cauces son el Val de Herrera, al norte y el barranco de la Vall al sur. En la parte occidental es el barranco de Mira el desagüe principal. En cualquier caso se trata de cursos predominantemente estacionales y en los que son frecuentes los desbordamientos con ocasión de lluvias intensas (Ramírez, 1995).

La Sierra de Alcubierre presenta una orientación general ONO-ESE. Su culminación topográfica la constituye el vértice de San Caprasio (812 m), siendo otra cota importante el vértice Torre Ventosa (788 m). Un escalón secundario de Alcubierre es la Sierra de Pallaruelo con la Punta de Purroy (632 m). La terminación meridional de la Sierra se produce en La Almolda. La red de drenaje se distribuye radialmente desde la Sierra de Alcubierre hacia los valles del Gállego y del Ebro, en su vertiente sur y hacia el río Flumen en la noreste, sin existir ningún cauce permanente, siendo todos ellos funcionales solo estacionalmente y a nivel local. Los emisarios más importantes de la Sierra de Alcubierre son los Barrancos de San Caprasio y Val de Zaragoza, enlazando el primero de ellos mediante circulación subsuperficial con el Barranco de Valpodrida, afluente a su vez del Flumen (Ramírez, 1998).

En la zona de estudio las pendientes son muy variables, presentando, en general, la zona de Zuera una topografía más ondulada, mientras que en la Sierra de Alcubierre es donde se encuentran los relieves más accidentados, que no representan graves problemas o limitaciones para los trabajos selvícolas, aunque existen todo tipo de pendientes.

1.3.2.2. Geología

A partir del Mioceno medio se abrió la cuenca endorreica del Ebro hacia el Mediterráneo, estructurándose el drenaje que va ser el fundamental de la cuenca y comenzando la

erosión alternada con otras épocas de sedimentación que le dieron la morfología definitiva, formándose relieves, conocidos como muelas, caracterizados por ser estructuras no erosionadas debido a la protección de un estrato superior algo más duro (en general calizas) que los subyacentes a los que protege (Pedrochi, 1998).

De acuerdo con el Mapa Geológico de España, Hojas 322, 323, 355, 356 y 385 (Ramírez, 1995; Costa *et al.*, 1998; Esnaola y Gil, 1998; Solá y Soriano, 1998; Soriano *et al.*, 1998), el área de estudio presenta en su mayor parte terrenos pertenecientes al Mioceno Aragoniense, aunque también aparecen algunos terrenos del Cuaternario, en concreto del Pleistoceno.

Zona de Zuera

En la mitad norte de esta zona se encuentran diferentes tipos de roca según se desciende en altitud, que son en general los siguientes: alternancia de calizas y margas en las zonas más altas; margas grises y ocres; calizas tractivas y margas; arcillas rojizas y verdosas con canales de gipsarenitas; alternancias de margas con calizas margosas; yeso tabular-nodular con calcisilitas o sales y yeso tabular con calcisilitas. Finalmente se llega a los valles de cultivo formados por gravas, arenas, limos y arcillas de carácter aluvial y pertenecientes al Holoceno (Cuaternario).

En la mitad sur de esta zona se encuentran fundamentalmente terrenos del Pleistoceno formados por cantos calcáreos, arenas, limos y arcillas (Glacis). Los valles pertenecen al Holoceno, como en el caso anterior.

Zona de Alcubierre

En la zona de la Sierra de Alcubierre predominan los materiales del Mioceno Aragoniense. Los materiales van variando según se desciende en altitud hasta llegar a la zona de valles. Se pueden distinguir cuatro amplias zonas con los siguientes materiales de mayor a menor altitud:

- En la zona norte, vertiente sur de la Sierra, se encuentran: alternancia de margas y calizas; margas y arcillas varioladas, con canales de areniscas en la base; calizas y margas; margas y tablas de calizas, localmente con yesos nodulares, y arcillas y margas varioladas con capas de areniscas y calizas.
- En la zona norte, vertiente norte, de menor altitud, aparecen: margas y tablas de calizas, localmente con yesos nodulares; areniscas de aspecto casi tabular, arcillas y

algunas calizas oscuras; alternancia de yesos tabulares y arcillas grises y limos, arcillas y gravas angulosas de glaciares subactuales, del Holoceno (Cuaternario).

- En la parte central de la Sierra aparecen: calizas micríticas y detríticas con estromatolitos y margas; arcillas rojizas, paleocanales de arenisca, margas y tablas de caliza, en la zona de San Caparasio; arcillas ocreas y margas, areniscas en paleocanales y en capas tabulares, tablas de caliza y yesos nodulares; calizas micríticas y detríticas con estromatolitos alternando con margas y arcillas ocreas y margas con areniscas y calizas (localmente con nódulos de yeso).
- En la estribación meridional se encuentran: margas, arcillas ocreas y rojizas, capas delgadas de caliza y de areniscas tabulares; calizas tractivas con nódulos de sílex y margas grises; calizas tractivas y margas grises y lutitas con intercalaciones de capas delgadas de caliza, ocasionalmente con estromatolitos.

Los terrenos de los valles en todas las zonas pertenecen al Holoceno (Cuaternario), y están compuestos en general por limos, arcillas, arenas y gravas, de carácter aluvial-columial.

1.3.2.3. Edafología

Según el Mapa de Suelos de España (Guerra *et al.*, 1966), el tipo de suelos que aparecen en estas zonas son:

En la zona de los montes de Castejón y Zuera:

- Suelos con horizonte de humus muy poco desarrollado sobre materiales calizos. Suelo pardo calizo sobre materiales no consolidados. Asociaciones con zonas pedregosas.
- Suelos rendziniiformes sobre margas yesíferas y yesos.
- Suelos con horizonte de humus muy poco desarrollado sobre materiales calizos. Suelo pardo o pardo rojizo calizo con horizonte de costra caliza.

En la zona de la Sierra de Alcubierre:

- Suelos con horizonte de humus muy poco desarrollado sobre materiales calizos. Suelo pardo calizo sobre materiales no consolidados. Suelos asociados con yeso.
- Suelos con horizonte de humus muy poco desarrollado sobre materiales calizos. Suelo pardo o pardo rojizo calizo con horizonte de costra caliza.

En cuanto a la productividad potencial forestal, ambas zonas se encuentran en las clases V (entre 1,5 y 3 m³/ha/año) y, en menor medida, en la Clase IV (entre 3 y 4,5 m³/ha/año), según el Mapa de Productividad Potencial Forestal (Gandullo y Serrada, 1977).

1.3.2.4. *Clima*

Según el Atlas Fitoclimático de España (Allué, 1990) toda la zona de estudio se encuentra distribuida en tres Subregiones diferentes, de la siguiente forma:

- Zona de Zuera: la mitad sur se encuentra en la Subregión IV₁ y la norte se distribuye entre la IV₃ (en la zona más central) y la VI(IV)₁.
- Zona de Alcubierre: la vertiente sur se encuentra en la Subregión IV₃, mientras que a la norte le corresponde la VI (IV)₁.

Las Subregiones IV₁ y IV₃ corresponden a un clima mediterráneo genuino, con atributos fitológicos infra-árbores estépico, el primero de ellos, y arbóreos, de bosques ilicinos exclusivos y genuinos, con clima típico más seco, el segundo.

La Subregión VI(IV)₁ corresponde a un clima nemoral nemoromediterráneo, con atributos fitológicos de planicaducifolia obligada subesclerófila.

De acuerdo con la información del Mapa Geológico de España, Hoja 355 (Esnaola y Gil, 1998), la clasificación climática de Papadakis indica que el clima dominante en la región es mediterráneo templado a seco, semiárido. La temperatura media para el período 1949-1985 estuvo comprendida entre 13 °C y 14 °C, con medias invernales de 2 a 4 °C, alcanzándose las temperaturas máximas en los meses de julio y agosto, con acusados contrastes térmicos a lo largo del año, y con diferencias máximas entre los meses de verano e invierno de 20 °C. La diferencia térmica entre el Cantábrico y el Mediterráneo es la causa del Cierzo, viento dominante, de componente noroeste, en toda la cubeta central del Ebro. La pluviometría media fue de 400 mm/año para el período 1949-1985. Las precipitaciones presentaron dos máximos en otoño y primavera y un mínimo relativo en invierno. La evapotranspiración potencial estuvo comprendida entre los 750 y 800 mm/año.

La escasez e irregularidad de las precipitaciones es el rasgo climático que mejor define el clima de esta zona. La cuenca del Ebro es una fosa de hundimiento de forma triangular rodeada de tres cordilleras, Cantábrica, Ibérica y Costero-Catalanas, que aíslan del efecto termorregulador que ejercen las masas de agua circundantes de la Península, creando frecuente nubosidad de estancamiento y efecto foehn que hacen que el aire que alcanza la depresión sea cálido, tenga escasa humedad relativa y, en consecuencia, estén muy reducidas las posibilidades de precipitación. Por el contrario, incrementa su capacidad evaporante y somete a un fuerte estrés a las distintas formas de vida (Creus, 1998).

1.3.2.5. Vegetación potencial y regiones naturales

Según las Series de Vegetación de España (Rivas-Martínez, 1987) la mayor parte de la zona de los montes de Castejón y Zuera, y la parte más norte y alta de la Sierra de Alcubierre, pertenecen a la Serie mesomediterránea manchega y aragonesa basófila de *Quercus rotundifolia* o encina (*Bupleuro rigidi-Querceto rotundifoliae sigmetum*), mientras que en las estribaciones más bajas de los montes de Castejón y Zuera se encuentra la Serie mesomediterránea-murciano-almeriense, guadiciano-bacense, setabense, valenciano-tarraconense y aragonesa semiárida de *Quercus coccifera* o coscoja (*Rhamno lycioydi-Querceto coccifera sigmetum*). Al resto de la Sierra de Alcubierre le corresponde la Serie supramediterránea manchega y aragonesa de la sabina albar o *Juniperus thurifera* (*Junipereto phoeniceo-thuriferae sigmetum*).

Si se tienen en cuenta las Series de regresión de Luis Ceballos, de 1941 (cit. en Montero de Burgos *et al.*, 1981), el nivel máximo de madurez que puede alcanzarse en estas zonas se correspondería con la etapa de los pinares, en la Serie de la encina (*Quercus ilex*) sobre terreno calizo, correspondiendo a masas naturales de *Pinus halepensis*, acompañado del matorral invasor heliófilo (*Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis* y *Quercus coccifera*) y matorral colonizador (*Cistus albidus* y *Cistus libanotis*).

En este mismo sentido se manifiestan Ceballos y Ruiz de la Torre (1971), explicando que “los contactos del pino carrasco con otras especies (que concretan) se deben a diferencias de suelo, de altitud o de aridez, o a sucesión por degradación. Al deteriorarse la estación, el pino sucede a *Quercus* (no se incluye en la relación *Q. coccifera*), *Olea* y *Pinus* y es sucedido por *Juniperus phoenicea*. El pinar de carrasco puede representar la climax de vegetación en regiones de acusada aridez, en posición intermedia entre los robles o restantes pinos y las sabinas, pero en buena proporción de sus manifestaciones representa una etapa sucedánea heliófila de especies de temperamento más delicado, teniendo, por tanto una significación interserial subordinada a dichas especies (encina, quejigo, acebuche.”.

De acuerdo con el Mapa Forestal de España (Ruiz de la Torre, 1990-1992), se correspondería con un nivel de madurez 6, bosque puro o mixto de especies no principales, pinar xerófilo.

Igualmente, Braun-Blanquet y Bolos (1957) distinguen tres cinturones de vegetación correspondientes a tres grandes comunidades vegetales climáticas (clímax), que se disponen más o menos concéntricas alrededor del centro de aridez situado entre Zaragoza y los Monegros, correspondiéndole así a la zona de estudio, en general, la clímax del pinar con coscoja (*Rhamneto-Cocciferetum cocciferetosum*). Estos autores describen diferentes asociaciones y subasociaciones existentes en las masas objeto de esta tesis.

Por otra parte, la zona se encuentra dentro de la región natural II del mapa de Gandullo *et al.* (1972) para *Pinus halepensis*. Además, se corresponde con la Región de Procedencia Monegros-Depresión del Ebro (Gil *et al.*, 1996), representando probablemente más del 80% de las masas de dicha procedencia.

1.3.3. Características generales de las masas de estudio

En Notivol *et al.* (2005) se muestran algunos estadísticos descriptivos de las variables cuantitativas más representativas de las masas forestales de cada una de las dos zonas estudiadas en este trabajo. La Tabla 2.5 del Capítulo 2 resume estos estadísticos para el total de las masas.

Los resultados del análisis de los datos recogidos en el inventario forestal llevado a cabo (descrito en el apartado 1.4 de este Capítulo y en Cabanillas *et al.*, 2005) ha permitido obtener algunas conclusiones generales para estas masas, que resultan de gran utilidad para sentar las bases de su gestión forestal. La descripción de la metodología y análisis estadísticos empleados se puede consultar en Notivol *et al.* (2005). Se indican a continuación algunas de éstas conclusiones:

- Se ha podido comprobar que las masas existentes en los montes objeto de este estudio presentan una estructura de masa regular. Según la clasificación de la IUFRO (omitiendo las clases "hundido" y "muerto"), se observa un gran número de pies pertenecientes al estrato codominante (el 75% en el conjunto global de las masas y el 70 y 80 % para Zuera y Alcubierre, respectivamente). Ello es debido al espaciamiento relativamente abierto con que crecen estas masas procedentes de regeneración natural y a su regularidad.

- El número medio de anillos a 1,30 m de altura de los árboles es 43, con un mínimo de 10 y un máximo de 109. El tercer cuartil es de 52 anillos, es decir el 75% de las parcelas presentan un número de anillos a 1,3 m inferior a los 52. El análisis del número de pies por clases de anillos indica que el 48% de los pies tiene entre 20-40 anillos a 1,3 m. Esta circunstancia es de gran importancia a la hora de plantear cualquier modelo de gestión de estas masas, dado que hay que considerar que incluso mediante la implantación de criterios físicos de cortabilidad, la edad de madurez que puede considerarse viene condicionada por la recurrencia del factor fuego. De la corta de árboles realizada para esta tesis, seleccionados de tal forma que representaran las diferentes clases diamétricas existentes y en la misma proporción (apartado 1.4.2. de este Capítulo), pudo deducirse que la edad puede estimarse como el número de anillos a 1,30 m más 12-15 años, según zonas (finalmente en esta tesis se aplicó la suma de 15).
- El número medio de pies por hectárea es de 483 pies/ha, con un máximo de 2.800 y un mínimo de 19, siendo algo mayor la media en Alcubierre que en Zuera. El tercer cuartil es 621 pies/ha. El área basimétrica media es de 10,85 m²/ha, oscilando entre un máximo de 43,69 m²/ha y un mínimo de 0,09 m²/ha.
- Aunque las masas de mayor superficie son, por lo general, coetáneas debido a la explosiva regeneración que se instala tras los incendios, la regeneración presenta niveles aceptables. Sin embargo, si no se abren huecos artificialmente mediante la aplicación de cortas de regeneración, es difícil que estas plantas prosperen con el suficiente vigor para constituir las nuevas masas. La producción de piñón garantiza la regeneración una vez las masas han alcanzado la madurez suficiente para que estos sean fértiles. Según los datos del inventario, la presencia de piñas es muy abundante, presentando un valor medio de 5,94, en una escala de 1 a 7, con valores mínimos de 3 y máximos de 7. El primer cuartil arroja ya un valor de 5,5. Sin embargo, el valor obtenido para piñas serotinas es sólo de 1,34, en la misma escala de valoración, presentando el tercer cuartil un valor de 1,30. Por otra parte, la presencia de piñas en el suelo da un valor de 1,81, en una escala de 0 a 3 (en la que el valor 0 representa ausencia de piñas).
- La abundancia de piñas en la copa, tanto total como serotinas, y en el suelo, es mayor donde se han realizado tratamientos selvícolas.
- El muérdago, como elemento indicador del vigor y, en definitiva, del estado fitosanitario de estas masas, está presente en más de un 80% de las parcelas, aunque el grado de afección medio es de 1,15 en una escala de 0 a 6. Se detecta mayor presencia de muérdago en árboles de mayor edad, en árboles aislados, y también en pies que crecen en peores estaciones. Los niveles 1, 2 y 3 de afección por muérdago se dan con áreas basimétricas similares, próximas a 7 m²/ha. La afección por muérdago es mayor cuanto mayor es el tamaño de la copa y su

proyección, independientemente de la orientación, y cuanto mayor es la defoliación. También es mayor dicha afección a medida que aumenta el diámetro y el diámetro medio cuadrático, y no hay afección por debajo de un valor medio de éste próximo a 12,5 cm. Los grados de afección 1, 2 y 3 se dan con fracciones de cabida cubierta similares y no hay afección por debajo de un valor medio del 12%. Se da una correlación entre el envejecimiento y el grado de afección por muérdago y no hay afección por debajo de un número medio de anillos a 1,30 m próximo a 30. La afección es superior en los montes de Alcubierre. En las clases de afección 1 a 3 el valor del volumen es similar y mucho menor en la clase 4.

- La altura de la copa y la altura total son mayores donde se han realizado tratamientos selvícolas.
- Los crecimientos de los 5 y 10 últimos años son superiores en Alcubierre. Ambos crecimientos decrecen conforme aumenta el grado de afección de muérdago.
- La fracción de cabida cubierta (FCC) es mayor en los montes de Zuera que en Alcubierre.
- La rectitud de los fustes es mayor en los montes de Zuera que en Alcubierre. También es superior donde se han realizado tratamientos selvícolas. El vigor apical es muy similar en ambas zonas.
- Destaca la escasez de las primeras edades de regenerado en Zuera.
- Los tratamientos selvícolas se han realizado en las zonas de mayor área basimétrica y por debajo de un valor de 6 m²/ha no se ha efectuado ninguno. También se han realizado en las zonas de mayor edad, mayor FCC, mayor densidad y mayor volumen.

Además, en la zona denominada en esta tesis como "Zuera" juegan un papel muy destacado los incendios forestales, tal y como se analiza en los apartados siguientes de este Capítulo de Introducción.

1.3.4. Evolución histórica de las masas estudiadas

Con objeto de conocer la evolución en la zona de estudio de las superficies arboladas con respecto a las desarboladas (matorral y cultivo) se han comparado mediante fotointerpretación las ortofotografías obtenidas en el vuelo del Sistema de Información Geográfica Oleícola Español del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1998) y las fotografías aéreas correspondientes al vuelo de 1957 (vuelo americano). Los fotogramas disponibles del vuelo del año 1982 finalmente no se han tenido en cuenta, ya que no se

apreciaban diferencias significativas, de tal forma que las diferencias que se buscan en la evolución del arbolado se observan de forma más acusada cotejando las imágenes más distantes en el tiempo.

A continuación se insertan las imágenes que representan las diferencias más llamativas encontradas en la evolución de la cubierta vegetal (Figuras 1.6 a 1.18). En todos los casos en la parte superior se inserta la imagen más antigua y en la inferior la más moderna.

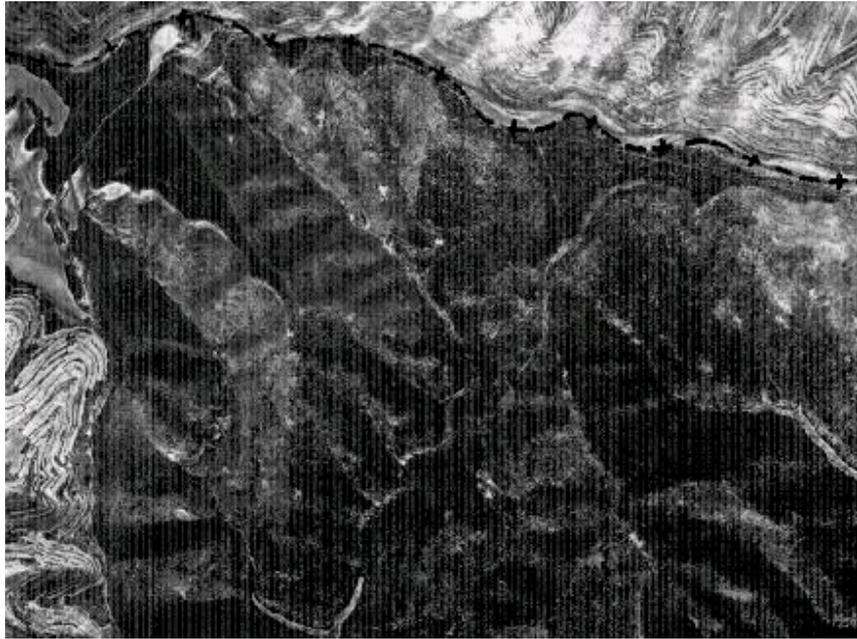


Figura 1.6. En la fotografía superior se observa en su mayor parte una superficie que en 1957 se estaba recuperando de un incendio ocurrido en 1952, y que se volvió a quemar posteriormente en otro incendio de 1986 (fotograma 50791 del vuelo del año 1957).

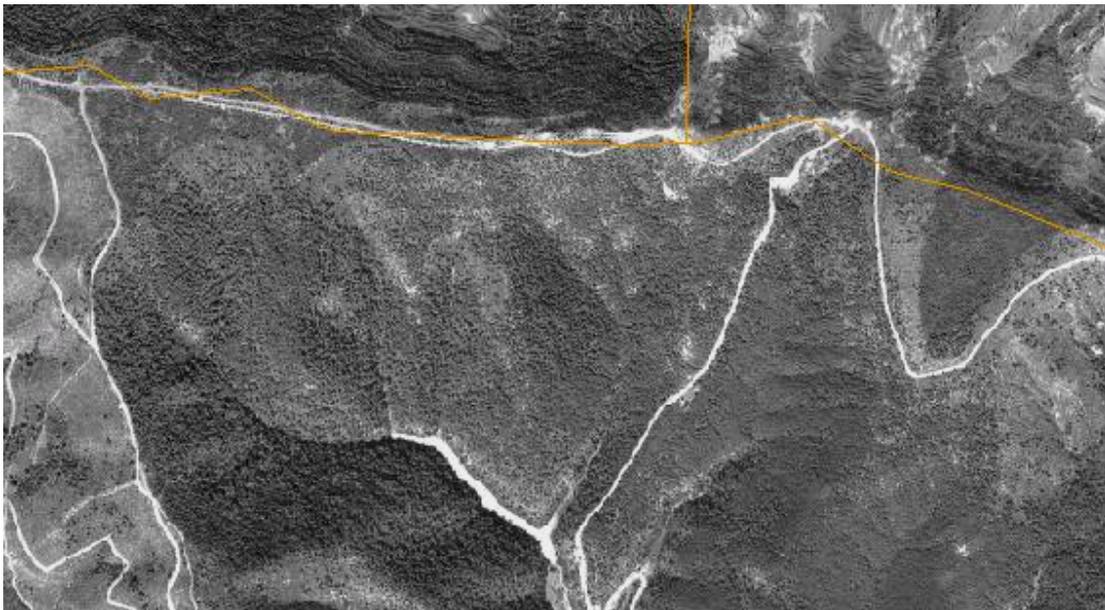


Figura 1.7. Un poco más al este de la zona comprendida en los anteriores fotogramas (Figura 1.6) puede observarse cómo la evolución de esta zona ha producido en la actualidad una cubierta arbolada más densa que hace 40 años. Esta recuperación ha sido posible gracias a la inexistencia de pastoreo tras el incendio forestal de 1943, lo que ha facilitado la instalación del pino carrasco al amparo de las buenas condiciones ambientales que brinda la zona para el desarrollo de masas de esta especie.

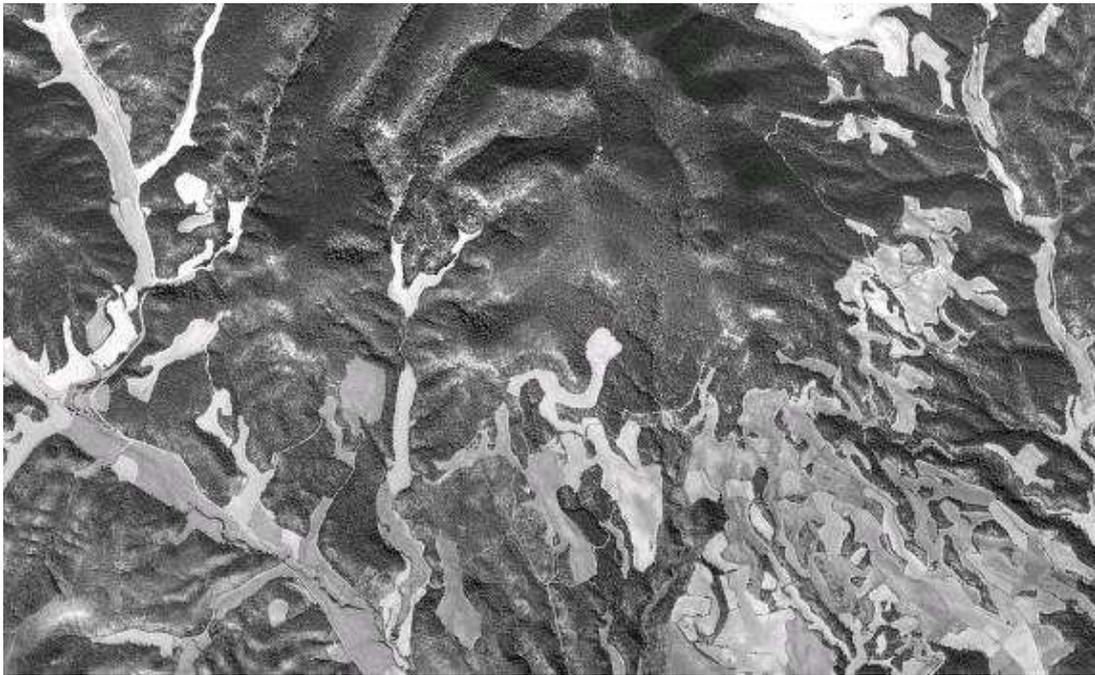
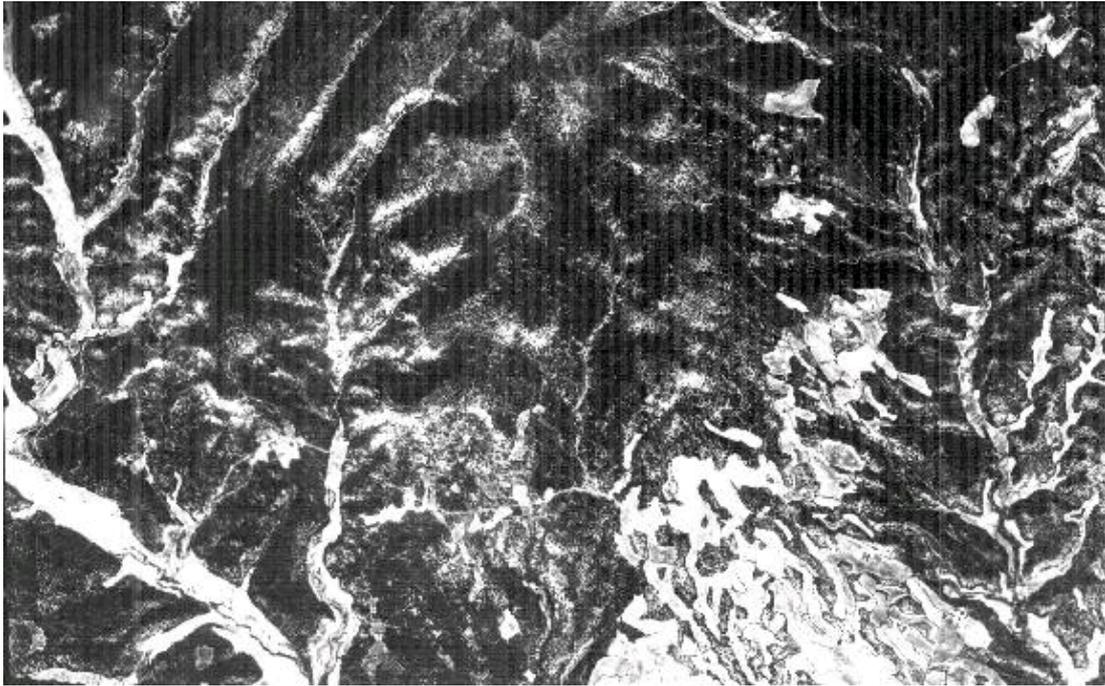


Figura 1.8. En las zonas bajas de los montes, entre las vaguadas cultivadas, se observan algunos terrenos actualmente cultivados que anteriormente se encontraban cubiertos por la vegetación arbórea, como puede apreciarse sobre todo en esta zona central del fotograma 52566 del vuelo de 1957.

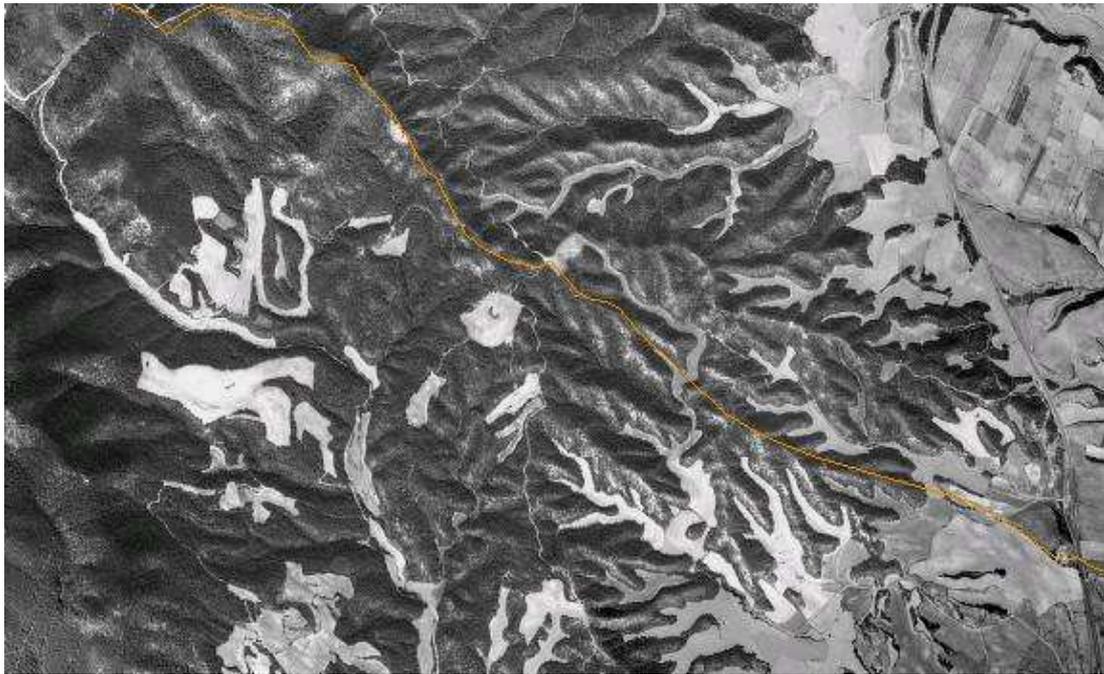
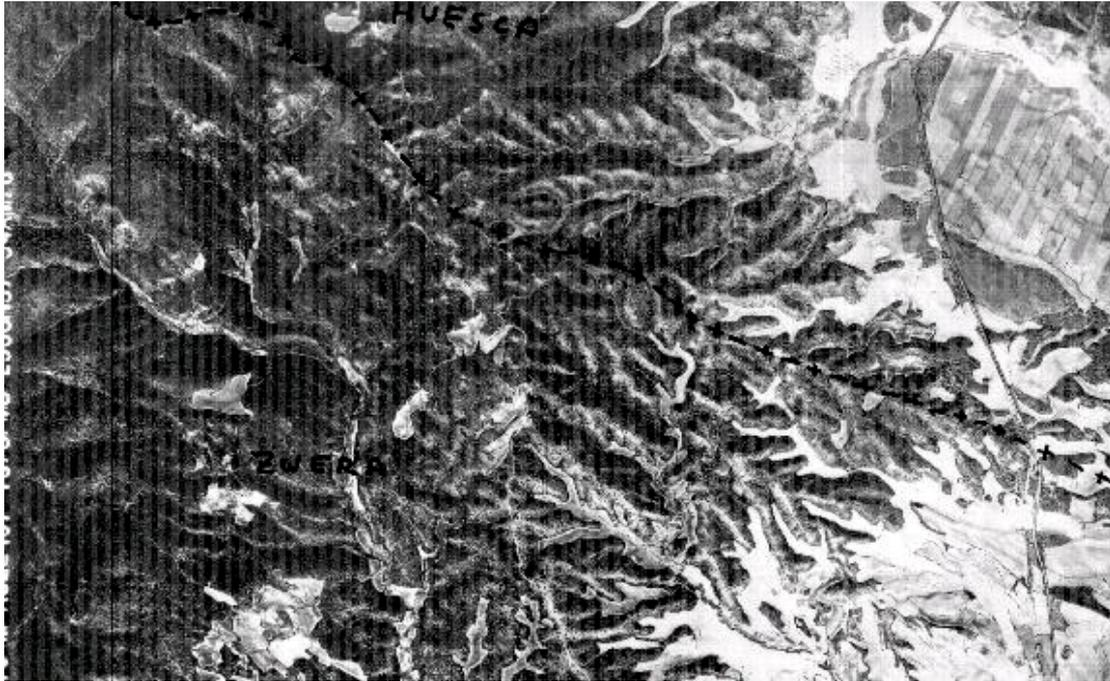


Figura 1.9. Las diferencias entre terrenos antiguamente arbolados que han pasado a cultivo no siguen una pauta concreta. En este caso se observa cómo la superficie cultivada se ha incrementado en las vaguadas estrechas y rodeadas de superficies de monte cerrado, mientras que los límites más netos entre lo que son las grandes áreas de cultivo y las masas arboladas del monte se han mantenido prácticamente intactas, como se observa por comparación con este fotograma tomado del vuelo de 1957 (fotograma 50789).



Figura 1.10. En los montes de Castejón de Valdejasa se observa de forma generalizada un avance muy significativo de las formaciones arboladas, ocupando los terrenos de antiguos cultivos que fueron abandonados al disminuir la población, avanzar las técnicas agrícolas y, por lo tanto, disminuir la demanda de terrenos para el cultivo. En estas comparaciones del fotograma 52568 del vuelo de 1957 puede apreciarse con claridad el avance del pinar sobre lo que eran piezas destinadas al cultivo agrícola.

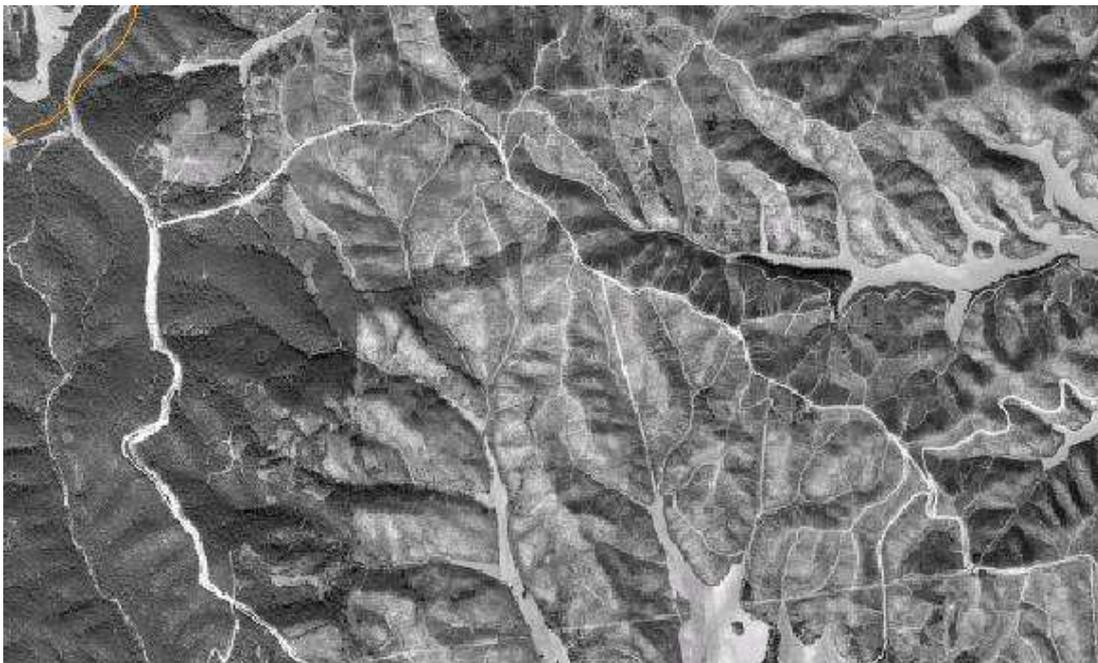
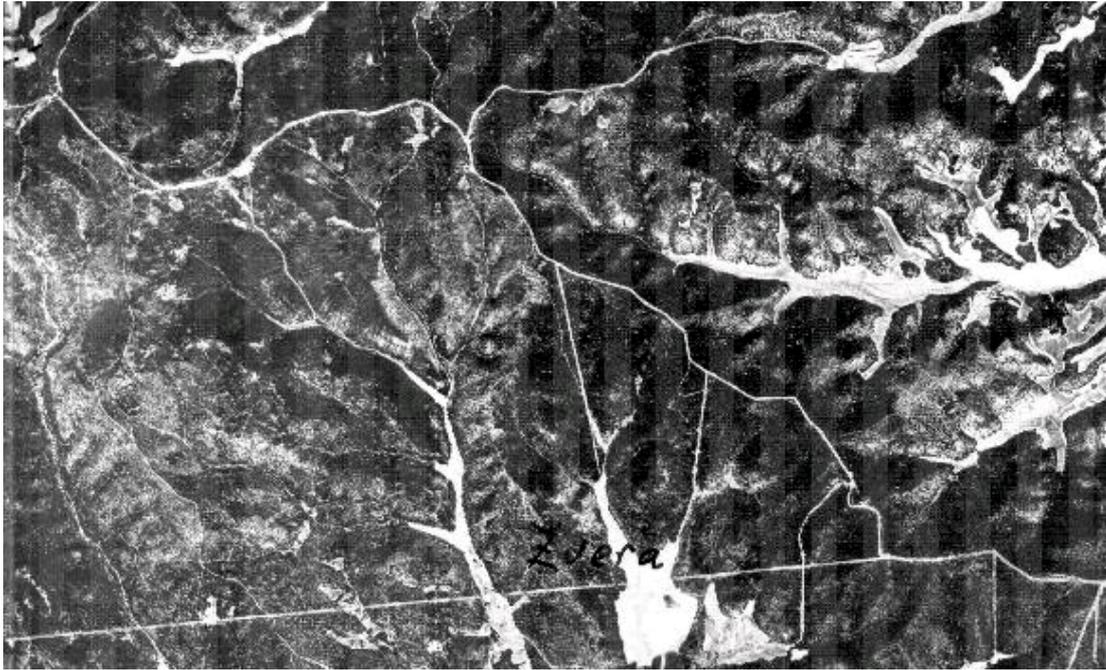


Figura 1.11. En estas imágenes correspondientes con parte del gran incendio de Zuera de 1995, en el fotograma 52511 de 1957 se aprecia una zona que también había sido incendiada hace tiempo, junto a áreas en las que se identifican señales de aprovechamientos intensivos (trochas de saca muy densas). Esta comparación da idea de la gran velocidad de renovación a que se han visto y se ven sometidas las masas de carrasco, ya sea por factores antrópicos (aprovechamientos) o naturales (incendios).



Figura 1.12. Se observa que en la imagen más moderna aparecen las áreas afectadas por los incendios de 1970 (zona central de la imagen) y de 1995 (zona derecha). Esta cercanía constata el alto riesgo de incendio que presentan estas masas. Junto a las zonas incendiadas se mantienen extensas zonas de bosque maduro sobre los cuales convendría actuar de modo preventivo, dado el riesgo constatado, mediante la aplicación de clareos que disminuyan el combustible, pudiéndose costear dichas operaciones con el material extraíble.



Figura 1.13. En estas imágenes de las zonas más meridionales de los montes de Zuera, correspondientes al fotograma 39212 del vuelo de 1957, se observa, además de la zona afectada por el incendio de 1995, un incremento muy significativo de las superficies dedicadas al cultivo agrícola.

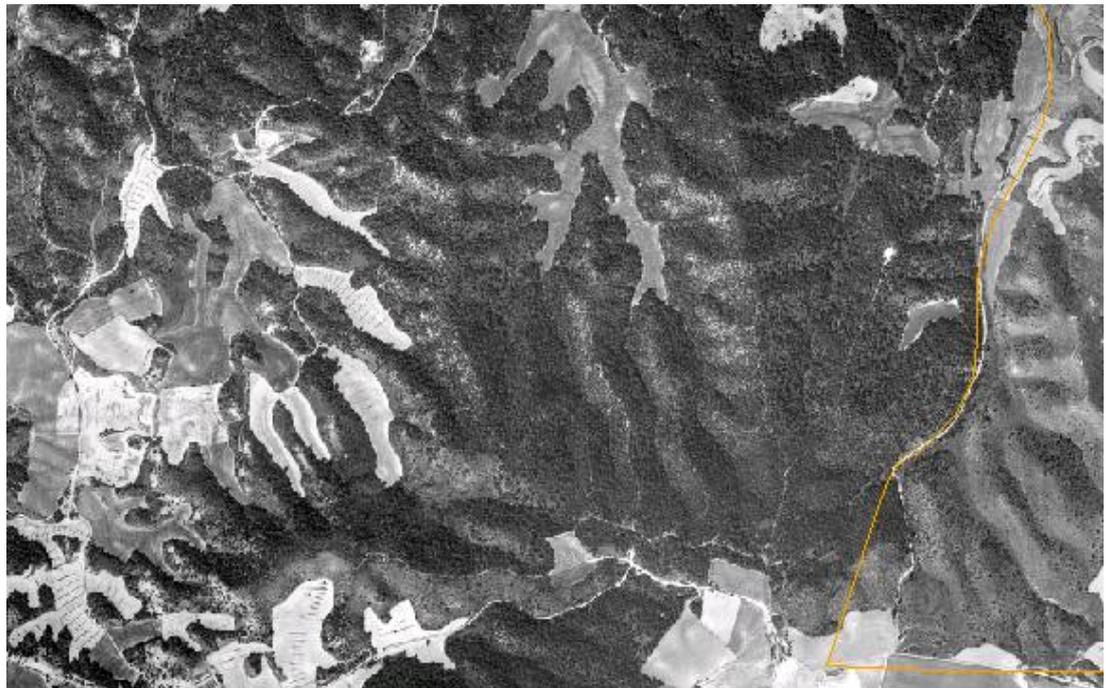


Figura 1.14. En estas imágenes correspondientes al monte de Utilidad Pública nº 268, “El Vedado del Horno”, en la parte norte del término de Leciñena se observa una progresión de la cubierta arbolada, distinguiéndose una mayor cobertura en la fotografía más reciente correspondiente al año 1998. En relación con el uso del suelo, sin embargo, no se observan cambios significativos, manteniéndose la relación entre superficies forestales y agrícolas.

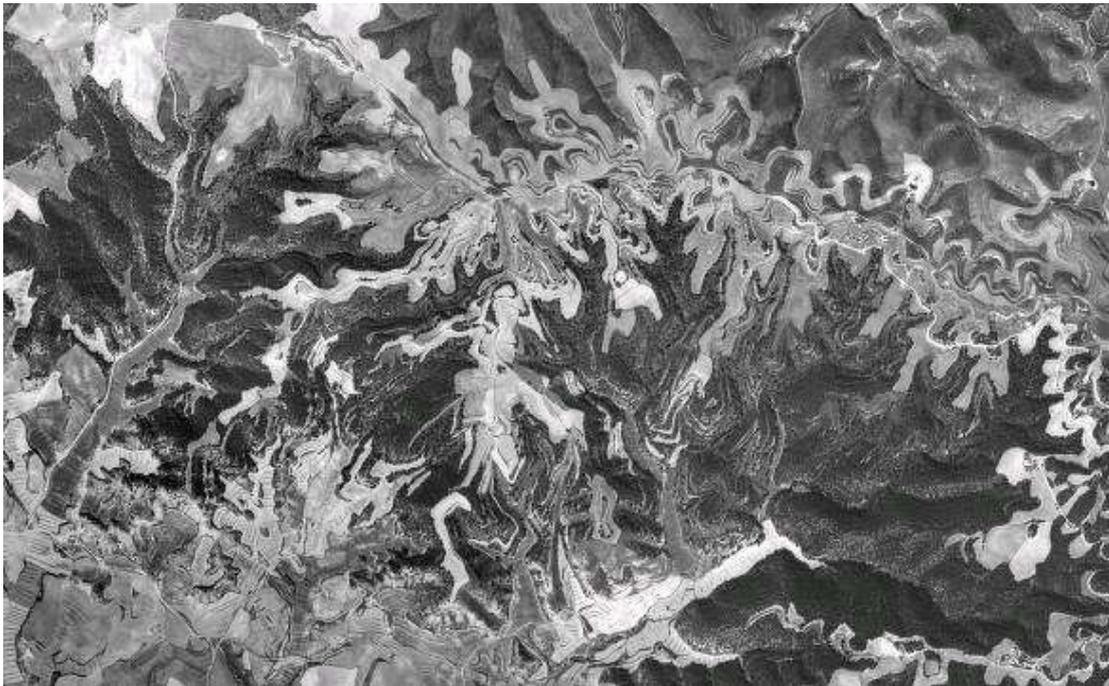
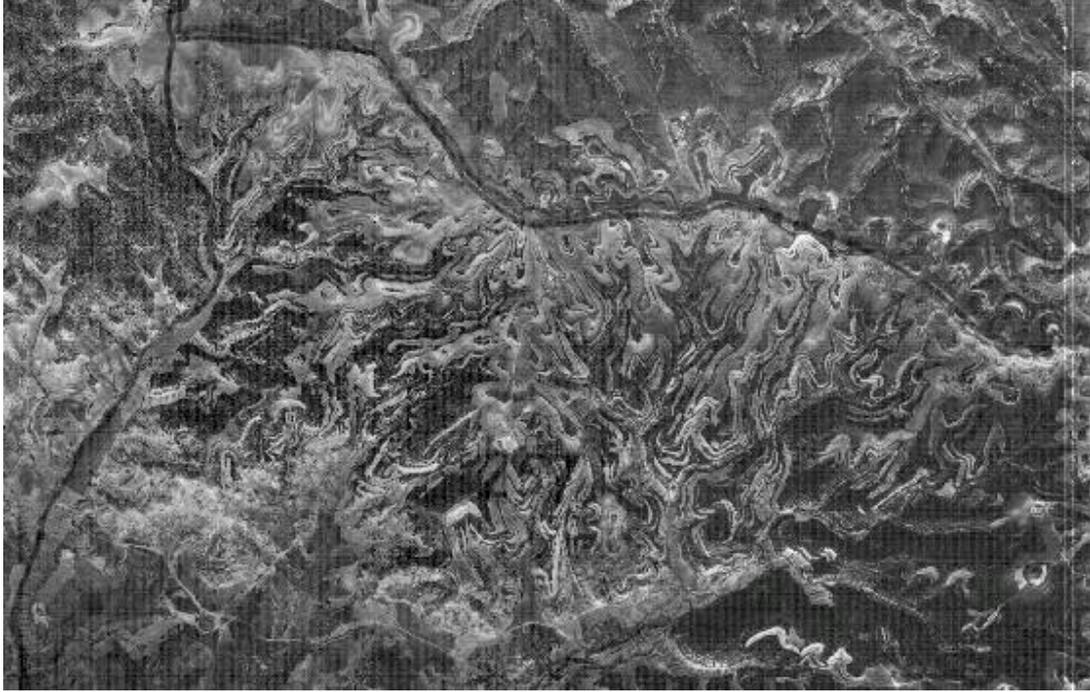


Figura 1.15. En estas fotografías del monte “La Sierra” de Leciñena, nº 257 del Catálogo de U.P., se observa de forma más acusada cómo la progresión de las zonas arboladas entre los cultivos abandonados ha dado lugar a un incremento notable de las áreas boscosas frente a las agrícolas.

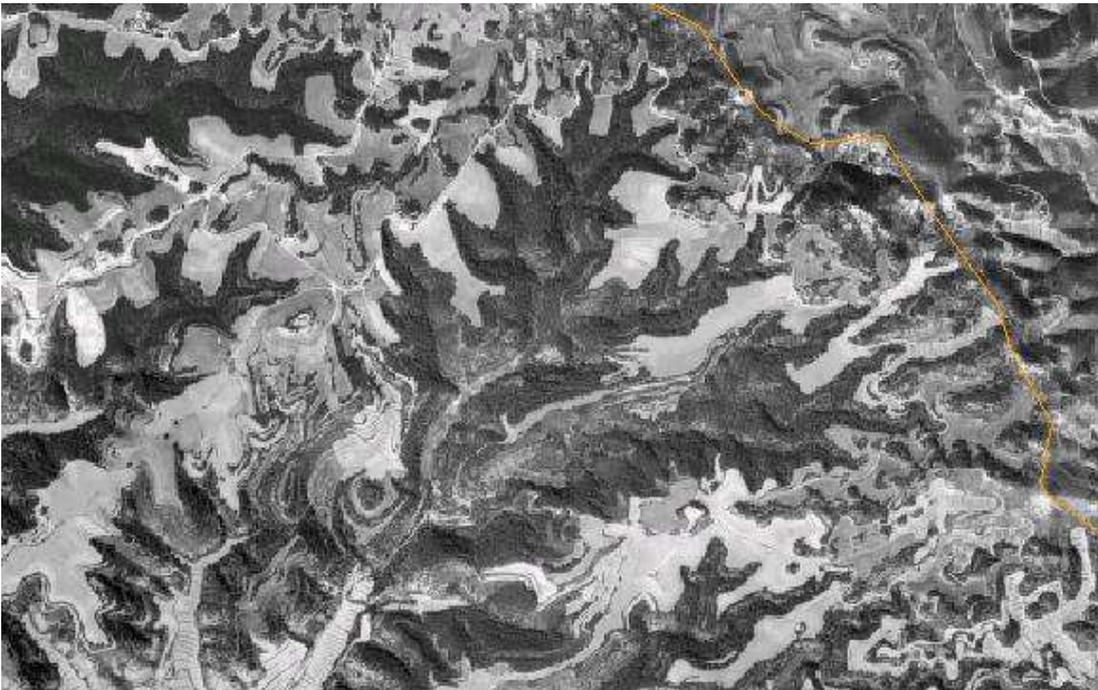
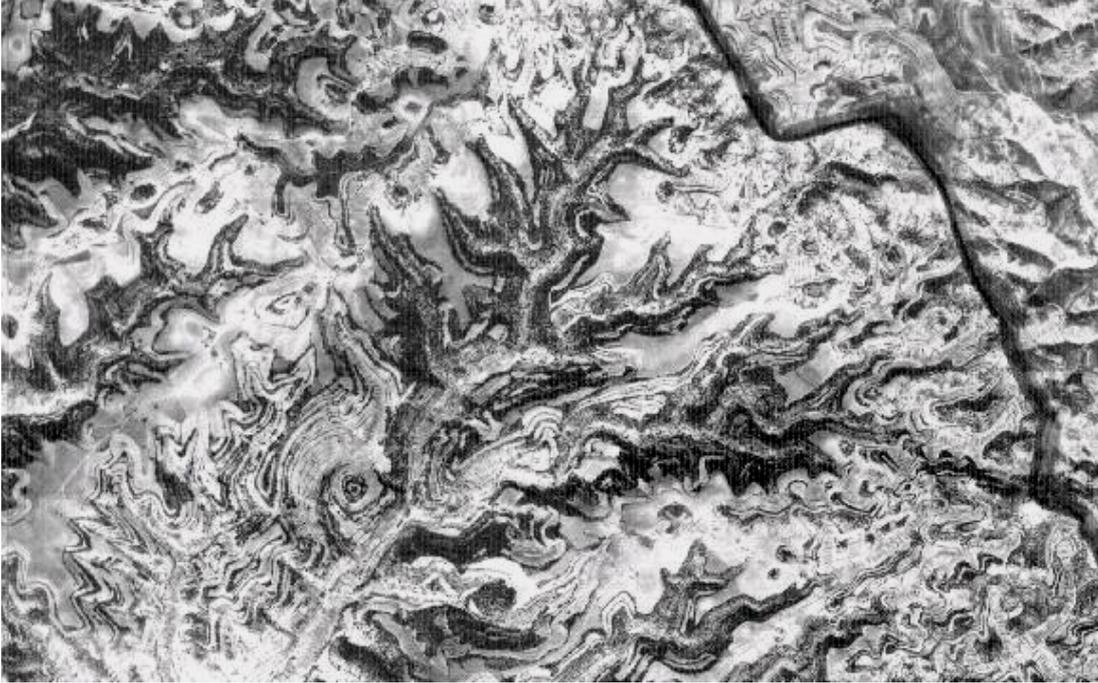


Figura 1.16. En estas fotografías, tomadas también sobre el monte “La Sierra” de Leciñena, se observa igualmente la citada progresión de las zonas arboladas frente a cultivos abandonados.



Figura 1.17. En este detalle del mismo monte 257 se observa con claridad el avance de las zonas cubiertas de matorral y arbolado en áreas que antaño eran presionadas por el diente del ganado. Sin embargo, las superficies cultivadas se han mantenido en estos cuarenta años.

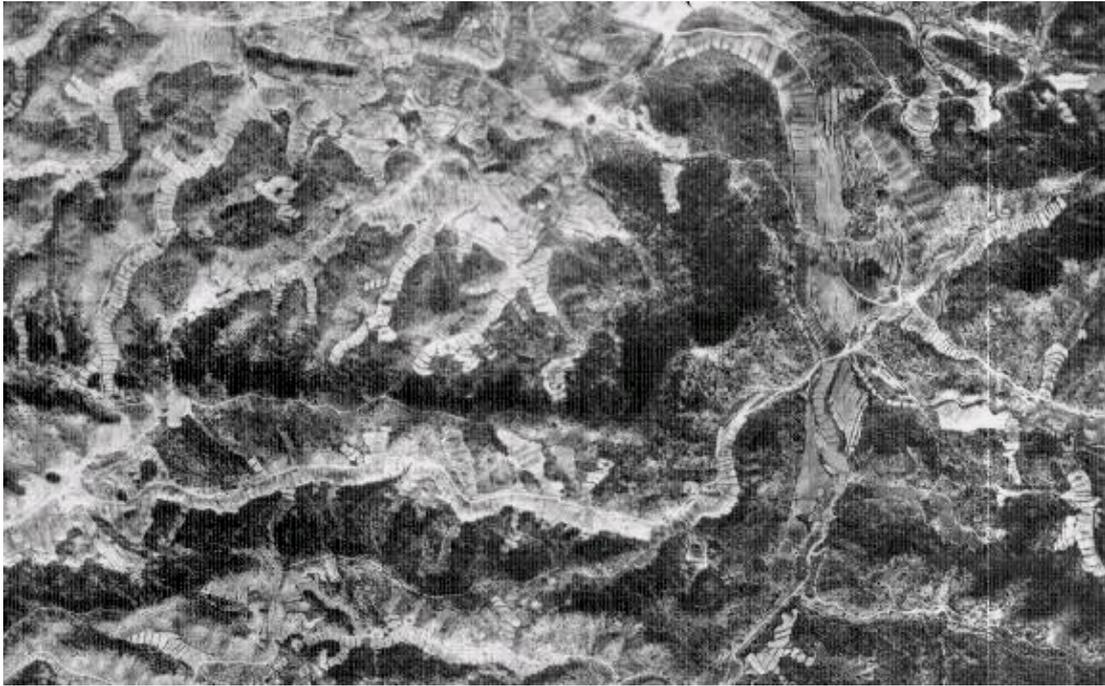


Figura 1.18. También en estas imágenes correspondientes al monte "Asteruelas", nº 259 del Catálogo, perteneciente al Ayuntamiento de Perdiguera, puede observarse la misma tendencia en la progresión de la cubierta vegetal de pino y matorral causada por la disminución del pastoreo.

Tras la comparación de las imágenes aéreas algunas de las conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

- En la zona de Zuera se observa la gran capacidad de restauración que poseen estas masas forestales de pino carrasco, cubriendo de forma rápida las zonas devastadas por los grandes incendios forestales en un plazo breve. Este periodo de restauración puede cifrarse en 20 ó 30 años hasta que se verifican las espesuras completas por la tangencia de copas.
- Las roturaciones de monte, sin resultar un grave problema por la escasa proporción de terreno que representan, han tenido durante el periodo analizado una repercusión negativa en la evolución de la superficie arbolada.
- No puede decirse lo mismo de los incendios, puesto que la restauración tras los mismos se produce hasta el momento de forma espontánea y suficientemente densa como para no considerar pérdidas de superficie arbolada por este concepto, aunque evidentemente se producen de una forma catastrófica no deseable por la pérdida de valores económicos y ecológicos.
- La disminución del pastoreo extensivo ha producido, de forma especialmente ostensible en la zona de Castejón de Valdejasa y la Sierra de Alcubierre, el avance de superficies arboladas y de matorral.

1.3.5. Análisis histórico de incendios

Los incendios forestales suelen tener gran importancia en las masas de *Pinus halepensis*, configurando su estructura y dinámica de regeneración, influyendo tanto la superficie de los mismos como la frecuencia con la que se producen. Por ello, se ha considerado interesante analizar de forma somera el régimen de incendios forestales en las masas de estudio, con objeto de determinar si juegan un papel fundamental en su dinámica, y si los rodales actuales proceden o no de regeneración tras incendio.

Por otra parte, tanto la frecuencia como la superficie de los incendios declarados en la zona pueden condicionar la planificación de las actuaciones selvícolas, si se considera como objetivo prioritario de la gestión la prevención de incendios. La no actuación en las masas más densas produce una acumulación de biomasa que, unida a la frecuencia de tormentas secas con aparato eléctrico, aumenta el riesgo de incendio forestal.

Se han utilizado los datos correspondientes a los partes de incendios disponibles que corresponden al período 1970–2001, así como otras referencias más antiguas, cuando ha sido posible su conocimiento, ya que 30 años se considera que no es un período suficiente para describir la historia y recurrencia de incendios forestales en estas masas.

Se ha observado tanto la distribución temporal como espacial de los incendios acaecidos en el período considerado, resultando una distribución de extremos, tanto en el número de incendios como en la superficie incendiada, por lo que los valores medios no son representativos, y no se aprecia una tendencia definida ni creciente ni decreciente en la serie de datos.

Se puede decir, entonces, que el número de incendios que anualmente se producen ronda entre un mínimo de 2-4 y un máximo de 7-10, siendo las superficies afectadas muy variables, entre unas pocas hectáreas y algunos cientos de ellas (excluyendo el gran incendio de Zuera). Tampoco se aprecia correlación entre el tamaño de los incendios y el número de los mismos.

El único gran incendio ocurrido en este período tuvo lugar en Zuera, en 1995, año en que se quemaron más de 3.100 ha, la mayor parte de las cuales correspondieron a este fuego.

En las Figuras 1.19 y 1.20 se muestra la evolución de la superficie incendiada y el número de incendios para cada una de las dos grandes áreas de trabajo consideradas en esta tesis.

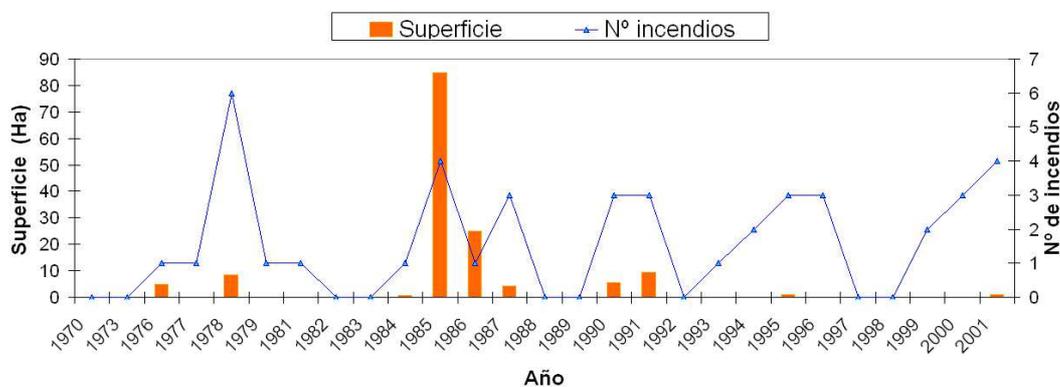


Figura 1.19. Evolución de los incendios forestales en la zona de Alcubierre (1970-2001)

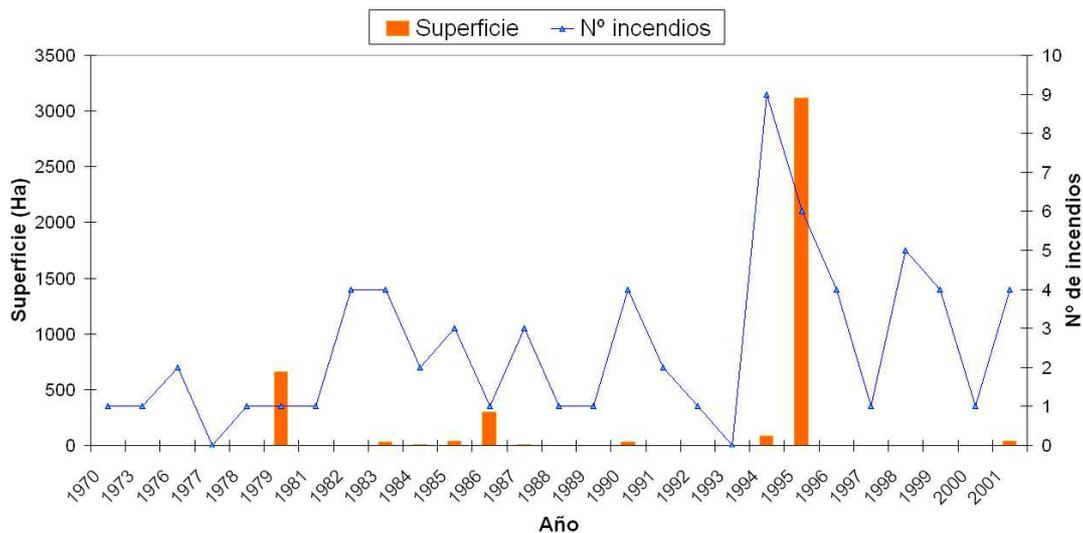


Figura 1.20. Evolución de los incendios forestales en la zona de Zuera (1970-2001)

Si no se tiene en cuenta el gran incendio de Zuera de 1995, los resultados de ambas zonas aparecen bastante semejantes, pero si se considera este incendio el término de Zuera presenta prácticamente el 95% de la superficie incendiada y el 30% de los siniestros en el total de las dos zonas, por lo que puede decirse que la frecuencia y gravedad de los incendios forestales es muy superior en Zuera.

En cuanto a las causas de estos incendios, en las Figuras 1.21 y 1.22 se representan los gráficos correspondientes a la clasificación de las mismas. En las zonas analizadas de Zuera y Alcubierre la causa más frecuente de los incendios forestales son los rayos, con mucha diferencia respecto del resto de las causas, sobre todo en los siniestros ocurridos dentro de la zona de Zuera, en la cual se presenta como la causa atribuible a más de la mitad de los fuegos. La segunda causa conocida más frecuente es la quema agrícola, lo que resulta coherente con los entornos cultivados de casi todos los montes estudiados. Debe destacarse el elevado porcentaje que representan las causas desconocidas, sobre todo en la zona de Alcubierre, correspondiendo a la segunda causa, y con un porcentaje casi tres veces superior al de la zona de Zuera.

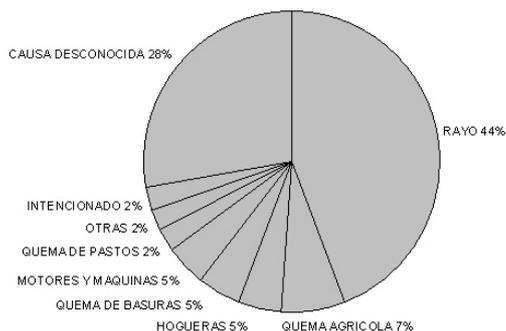


Figura 1.21. Causas de los incendios forestales en la zona de Alcubierre (1970-2001)

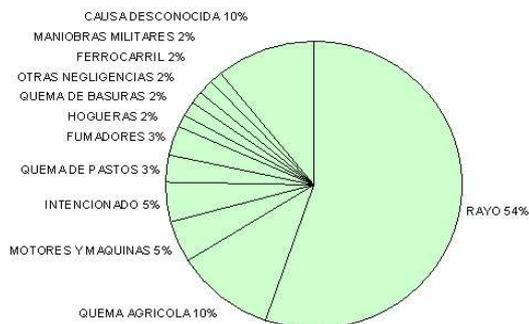


Figura 1.22. Causas de los incendios forestales en la zona de Zuera (1970-2001)

En la Tabla 1.1 se incluye la superficie quemada por zonas y causas (debe tenerse en cuenta que dado el redondeo a dos decimales de las bases de datos pueden aparecer número de incendios que suman o hectáreas, al ser conatos de superficie muy reducida). En el Anexo I se muestra un mapa de los incendios por causas y zonas.

Tabla 1.1. Número de incendios y superpie afectada por causas y zonas (1970-2001)

ALCUBIERRE			ZUERA		
Causa	Nº de incendios	Superficie (has)	Causa	Nº de incendios	Superficie (has)
RAYO	19	90,50	RAYO	36	461,02
QUEMA AGRICOLA	3	5,20	QUEMA AGRICOLA	7	13,00
HOGUERAS	2	3,50	HOGUERAS	1	20,00
QUEMA DE BASURAS	2	0,00	QUEMA DE BASURAS	1	0,00
MOTORES Y MAQUINAS	2	0,00	MOTORES Y MAQUINAS	3	3.103,00
QUEMA DE PASTOS	1	0,00	QUEMA DE PASTOS	2	0,00
INTENCIONADO	1	0,00	INTENCIONADO	3	27,04
CAUSA DESCONOCIDA	12	36,65	CAUSA DESCONOCIDA	7	27,00
OTRAS	1	0,00	FUMADORES	2	0,11
			OTRAS NEGLIGENCIAS	1	0,00
			FERROCARRIL	1	0,00
			MANIOBRAS MILITARES	1	0,00

En general, y como conclusión, se puede decir que en la zona de los montes de Zuera se ha observado una mayor influencia de los incendios forestales que en la zona de Alcubierre. Este hecho influye significativamente en la estructura de las masas, ya que los grandes incendios que se suceden en el tiempo producen grandes superficies coetáneas y de

elevada densidad, lo cual parece que ocurre más en la zona de Zuera que en la de Alcubierre, si se tienen en cuenta referencias más antiguas, ya que el período de datos existentes no se considera suficiente para el análisis de recurrencia de incendios. Se muestra en la Figura 1.23 el mapa de incendios documentados de la zona de Zuera, mayores de 15 ha, hasta el año 2008. Este mapa no se muestra para la zona de Alcubierre, ya que sólo se ha podido documentar un incendio mayor de 15 ha.

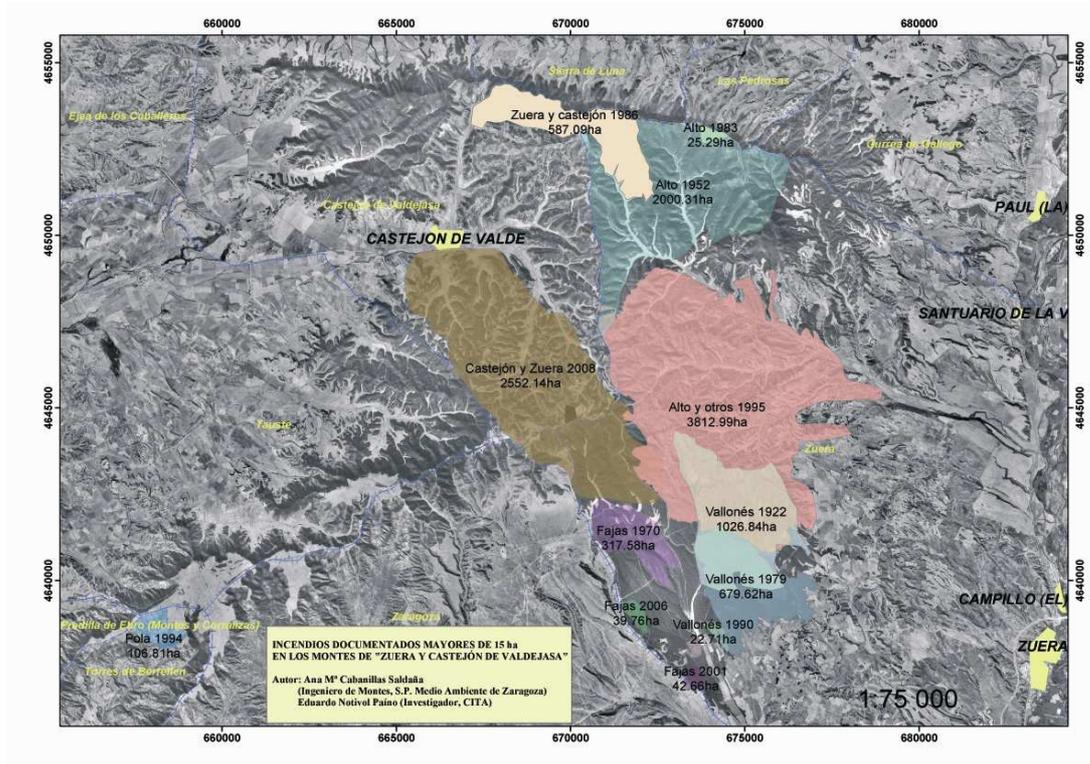


Figura 1.23. Incendios documentados en la zona de Zuera, mayores de 15 ha, hasta el año 2008

1.3.6. Algunas generalidades para la gestión de las masas de este estudio

1.3.6.1. Principios y objetivos a considerar en la gestión

Los principios y objetivos generales que deben regir la gestión de estas masas son los mismos que deben considerarse en cualquier ordenación de montes, y que según Madrigal (1994) son los siguientes:

- La persistencia, estabilidad y mejora de los sistemas forestales.
- El rendimiento sostenido de todas las utilidades (productivas y no productivas) que son capaces de generar los sistemas forestales.
- El máximo de utilidades o uso múltiple del monte.

Entre estos, el principal objetivo concreto que debe marcar la gestión de estas masas es la búsqueda de su persistencia mediante la regeneración natural de la masa, sin intervención del incendio forestal, y empleando las herramientas que la selvicultura ofrece.

Debe plantearse como segundo objetivo concreto el mantenimiento y ampliación del máximo de utilidades y la consecución de un rendimiento sostenido que permita el establecimiento y la ejecución de la selvicultura necesaria sin necesidad de inversión pública externa al monte, dada la problemática actual existente, tal y como se comenta en el apartado siguiente, y que no se prevé se corrija en un futuro próximo.

Las masas objeto de este estudio cumplen actualmente con todas las funciones descritas anteriormente (apartado 1.2.4): ecológicas (antierosión, hidrológicas, climáticas), sociales (recreativas, paisajísticas, sanitarias) y económicas (madera y otros productos secundarios). Destacan por su importancia las primeras y están en progresivo aumento las segundas, dada su proximidad a un núcleo urbano importante. El carácter productivo se centra en los aprovechamientos no madereros (ganaderos, cinegéticos, agrícolas, etc.).

Estos montes se encuentran declarados como Lugares de Importancia para la Conservación (LIC) y Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA), formando parte de la Red Natura 2000. Concretamente forman parte de los siguientes LIC, que destacan por los hábitats de la Directiva que se reseñan (en negrita los más importantes):

- ES2430078 "MONTES DE ZUERA":

Código	Descripción
1520	Vegetación gipsícola ibérica (<i>Gypsophiletalia</i>)
5210	Matorrales arborescentes de <i>Juniperus</i> spp.
9540	Pinares mediterráneos de pinos mesogeanos endémicos (<i>Pinus halepensis</i>)

- ES2410076 "SIERRAS DE ALCUBIERRE Y SIGENA":

Código	Descripción
1430	Matorrales halo-nitrófilos (<i>Pegano-Salsoletea</i>)
1520	Vegetación gipsícola ibérica (<i>Gypsophiletalia</i>)
3140	Aguas oligomesotróficas calcáreas con vegetación béntica de <i>Chara</i> spp.
4090	Brezales oromediterráneos endémicos con aliaga
5210	Matorrales arborescentes de <i>Juniperus</i> spp.
5330	Matorrales termomediterráneos y pre-estépicos
6220	Zonas subestépicas de gramíneas y anuales del <i>Thero-Brachypodieta</i>
6420	Prados húmedos mediterráneos de hierbas altas del <i>Molinio-Holoschoenion</i>
9240	Robledales ibéricos de <i>Quercus faginea</i> y <i>Quercus canariensis</i>
92D0	Galerías y matorrales ribereños termomediterráneos (<i>Nerio-Tamaricetea</i> y <i>Securinegion tinctoriae</i>)
9340	Encinares de <i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus rotundifolia</i>
9540	Pinares mediterráneos de pinos mesogeanos endémicos (<i>Pinus halepensis</i>)
9560	Bosques endémicos de <i>Juniperus</i> spp.

y de las ZEPA :

- ES0000293 "MONTES DE ZUERA, CASTEJÓN DE VALDEJASA Y EL CASTELLAR".
- ES0000295 "SIERRA DE ALCUBIERRE".

Así, el primer objetivo a tener en cuenta debe ser el mantenimiento de las funciones que presenta la masa, en sus tres vertientes, ecológica, social y económica, intentando aumentar la importancia de ésta última. Se debe considerar y fomentar el uso múltiple de la masa, buscando aquellos usos que sean compatibles entre sí y respetuosos con el medio natural.

Los nuevos objetivos a considerar en la gestión son:

- Contribuir a la reducción del cambio global del planeta:
 - Las masas son importantes reservorios de CO₂.

- Fuentes de biomasa energética, alternativa para reducir el consumo de combustibles fósiles.
- La prevención de incendios forestales es fundamental para conseguir los dos objetivos anteriores.
- Contribuir a la conservación y mejora de la diversidad biológica, como parte de la Red Natura 2000 de la Unión Europea.

Por otra parte, el gestor debe conocer e intentar mitigar los efectos negativos de los factores de predisposición al decaimiento ante un escenario probable de gran variabilidad climática, que puede causar cambios bruscos en las comunidades forestales. Las decisiones de los gestores han de considerar estos patrones de cambio rápido, episódico, a pesar de que las tendencias de cambio sean difícilmente detectables a escalas espaciales y temporales mayores. En otras palabras, el cambio puede producirse súbitamente en medio de períodos en los que no pasa casi nada (Camarero *et al.*, 2004).

Debe considerarse como meta final la aplicación del mejor conocimiento científico disponible en la adaptación y mejora continua de la gestión. La gestión debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a los cambios globales que se están produciendo y a los que están por venir.

Y además, siempre se deben aplicar las habitualmente denominadas “buenas prácticas ambientales”, como por ejemplo:

- Dejar rodales testigo, sin gestión forestal.
- Mantener un cierto número de árboles viejos y/o muertos dentro de los rodales de corta, que persistan a lo largo de los diferentes turnos hasta su decrepitud, e incluso una proporción de “madera muerta”.
- Considerar y prever el mantenimiento y conservación de la diversidad de especies y de ecosistemas, etc.

1.3.6.2. Restricciones y problemática a considerar en la gestión

Uno de los principales problemas a que están sometidas estas masas es el progresivo abandono de la gestión selvícola. Ésta se caracteriza por intervenciones erráticas, no planificadas ni en el tiempo ni en el espacio, y sin responder a un objetivo determinado. Esto es debido tanto a la falta de rentabilidad económica como a la creciente tendencia a

derivar las inversiones públicas en materia forestal hacia la extinción de incendios forestales, en detrimento de la prevención y la silvicultura.

La falta de rentabilidad dificulta la ejecución de planes de gestión razonables, dejando la iniciativa al fuego.

No se puede dejar de lado el hecho de que las inversiones para tratamientos silvícolas son muy limitadas y que la política forestal se encuentra alejada de la realidad silvícola de las masas. Por ello, se hace imprescindible asegurar la persistencia de las mismas de una forma autofinanciable, que no dependa del devenir político, buscando una rentabilidad social acorde con la presumible escasa financiación futura.

Otro de los problemas a los que deben enfrentarse estos montes es a los efectos que el cambio climático está produciendo, entre ellos el decaimiento de las masas. Puede observarse (desde hace al menos una década, por observación directa propia), el progresivo declive de la masa, sobre todo afectada en las zonas de solana y fuerte pendiente, donde poco a poco van muriendo los ejemplares adultos, sin observarse una adecuada regeneración. Esto puede deberse a la presencia de suelos con poca capacidad de retención de agua, los cuales aumentan la susceptibilidad al estrés hídrico, haciendo a los árboles más vulnerables a episodios climáticos críticos como sequías intensas (Thomas y Hartmann, 1996; Demchik y Sharpe, 2000; Peñuelas *et al.*, 2000). La presencia generalizada de muérdago, como se ha comentado en un apartado anterior, puede ser un claro indicador de ello.

Los incendios forestales, si bien pueden considerarse un problema, no son causa de regresión de la masa, pues están facilitando su renovación en algunos casos. Sin embargo, como ya se ha comentado, no es conveniente dejar la renovación y regeneración de la masa al devenir de los incendios, sino que éstas deben estar adecuadamente programadas en la gestión silvícola. Si el clima no es adecuado en los dos años siguientes al incendio puede haber problemas de regeneración, como también se ha comentado en apartados anteriores. Además, la cantidad de semilla disponible, la pendiente y la orientación influyen considerablemente en la regeneración tras incendio. Por otra parte, los incendios contribuyen al aumento del efecto invernadero, con el aporte de CO₂ que se produce, y acortan el tiempo que éste permanece retenido en el bosque.

También es preciso considerar las posibles dificultades de regeneración que pudieran producirse tras las cortas de regeneración, por alguna o varias de las siguientes causas:

- Inadecuada fructificación y/o viabilidad de la semilla.
- Inadecuadas condiciones del suelo para permitir una buena germinación de las semillas.
- Inadecuadas condiciones climáticas, que incidan en los dos factores anteriores.

Otro factor a considerar en las intervenciones selvícolas de estas masas es la presencia de coscoja (*Quercus coccifera*). La puesta en luz que se produce tras los clareos, claras y cortas de regeneración favorece el desarrollo de la misma, entrando en competencia con el propio pino y pudiendo dificultar su regeneración. Aunque no se ha demostrado en estas masas que esto sea así (por la falta de cortas de regeneración), sin embargo sí se dispone de información directa de otras zonas (p.ej. montes de Valencia) en las que esta competencia no supone finalmente dificultad para el establecimiento del regenerado de pino, que acaba sobrepasando a la coscoja, tras las cortas a hecho. Sí se ha observado en estas zonas, sin embargo, dificultad en la regeneración tras el tratamiento de las masas por aclareo sucesivo y uniforme. También por observación directa, en las masas de este estudio se ha podido comprobar que tras la muerte de uno o varios individuos adultos la regeneración es buena en los claros creados, incluso con la presencia de coscoja, por lo que no parece ser el factor limitante para la misma, aunque supone una fuerte competencia en las primeras fases de desarrollo, lo cual puede ser muy negativo cuando se presenten simultáneamente otros factores limitantes.

1.3.6.3. Turnos

Martín (1947) aconseja para los montes protectores que los turnos deben ser muy breves, basándose en que el árbol joven tiene más salud y la masa nueva acumula más hojarasca, admite más espesura de copas y, por lo tanto, mayor densidad de follaje, lo que proporciona la máxima protección y enriquecimiento de los suelos. También indica que la ordenación debe basarse en la calidad del rodal, fijando turnos diferentes por rodales.

Para Italia, Ciancio (1986) propone turnos de 40 años para masas artificiales productivas, bajándolos incluso a 30 años para trituración. Sin embargo, para masas naturales aumenta los turnos a 50-70 años, dependiendo de la fertilidad, e incluso propone una estratificación de la masa en tres estratos, uno de árboles sobremaduros de 70-90 años, otro de árboles maduros de 45-50 años y el último con la masa procedente de la regeneración.

Abbas (1986), para el Sudeste mediterráneo francés, presenta el máximo crecimiento medio en volumen a los 75 años para todas las calidades, aunque en realidad esta edad aumenta a medida que se disminuye en calidad, pues realizó sus curvas de calidad para esa edad de referencia.

Para Túnez, Souleres (1975) estudió que la producción media en volumen era claramente más alta con diámetros pequeños que con diámetros mayores, lo que podría justificar turnos cortos (Erviti, 1990). Sin embargo, más tarde Chakroun (1986) indica que la edad de explotación se encuentra entre 80 a 120 años, edades a las que el diámetro medio alcanza los 30 cm.

Para la Costa Adriática, Klepac (1986), propone una estructura de la masa por bosquetes, y aunque no indica el turno, si proporciona una tabla del número de pies por hectárea según la edad, que va de los 20 a los 80 años.

Castellani *et al.* (1980-82), para Italia, realizaron sus tablas de producción hasta los 70 años para cuatro calidades. Erviti (1991) considera que en su estudio quedan justificados turnos entre 40-50 años, incluso menores en la máxima calidad, basados en la edad del máximo crecimiento anual en volumen. Atendiendo a este mismo criterio, este autor también cree que la edad de 60 años es un turno demasiado largo para masas productoras de mejor calidad (haciendo referencia a la parcela 13 de Murcia, de las 72 parcelas permanentes del INIA).

Para Argelia, Franz y Foster (1980) establecieron sus tablas de producción hasta una edad de 160 años, para las trece calidades que propusieron. Röhle (1992), para Israel, las construyó hasta los 60 años. Las de Couhert y Duplant (1993), para la región francesa de la Provenza-Alpes-Costa Brava, están realizadas hasta los 80-120 años, aumentando la edad según se disminuye en calidad. Más actuales, y para España, las tablas de producción de Montero *et al.* (2001) están realizadas hasta los 120 años.

Para las masas naturales de *Pinus halepensis* de Marruecos, ubicadas en su mayor parte en la región del Alto Atlas, se utilizan turnos medios de 60 años (Belghazi *et al.*, 2000).

En los Planes Técnicos de Gestión y Mejora Forestal y Usos Industriales para las masas privadas catalanas se consideran turnos medios de 60-70 años (Valero, 2000).

Llobet *et al.* (2002) y Llobet (2008) proponen para las masas catalanas turnos de 60-70 años para las zonas de calidad I, para uso de sierra, y turnos más cortos, de 35-40 años, si es para trituración. Para la calidad II, también para trituración, proponen turnos de 40-45 años. Para la peor calidad, la III, proponen turnos de 120 años, por no tener la masa un objetivo de producción sino paisajístico.

Dadas la falta de rentabilidad y de inversiones, comentadas en el apartado anterior, se debería obtener el máximo potencial de crecimiento que permita la estación, minimizando además los costes de los tratamientos. Es aconsejable maximizar los productos y minimizar el tiempo de obtención de los mismos. Esto podría conseguirse revalorizando el valor de la madera de varias formas:

- Mediante nuevos u olvidados usos, como son los energéticos, mediante turnos cortos que aprovechen el período de máximo crecimiento en volumen para la especie en estas zonas de suelos pobres y degradados, entre 20 y 60 años según Montero *et al.* (2001).
- Con turnos largos para las zonas de Calidad I, que permitan un desarrollo máximo del árbol (80-120 años según curvas de calidad, realizadas en el Capítulo 5) y su aprovechamiento para otros usos madereros distintos de la trituración (uso actual más frecuente para la especie), por ejemplo para madera de sierra o postes.

En este sentido, y aunque el turno debe ser fijado en función de los objetivos que se determinen para los diferentes rodales establecidos (en función de la calidad de la estación y otras características de la masa que permitan su discriminación), se propone de forma general para estos montes lo siguiente:

- Turnos largos, entre 80 y 100 años, para:
 - Los rodales de calidad I, ya que permiten el máximo desarrollo del árbol en altura y diámetro y el aprovechamiento de la madera en la industria del aserrado, y por lo tanto la obtención de un mayor valor económico. En algunos casos podría llegarse hasta los 120 años, aunque debe observarse que no se produzca estancamiento del crecimiento y pudrición de la madera.
 - Los rodales de Calidad III, ya que no se busca producción, sino el mantenimiento y regeneración de la masa. Este turno es adecuado siempre y cuando quede asegurada la regeneración, por el vigor suficiente de la masa para una adecuada producción de piña.
 - Objetivos ambientales de captación de CO₂, ya que éste permanece durante más tiempo en el bosque.

- Objetivos ambientales de conservación de la biodiversidad.
- Cualquier calidad cuando no se pretenda ningún aprovechamiento maderable y el objetivo final sea social o recreativo, especialmente importante en estas masas cercanas a una gran ciudad, y consideradas como el pulmón de la misma.
- Turnos cortos, entre 40 y 60 años, para:
 - Las calidades I y II si se pretende un objetivo de viabilidad económica con fines más productivos, bien para trituración o biomasa.
 - Las calidades II y III si se pretende la mayor protección del suelo, o si no queda garantizada la regeneración a edades superiores. También si se prevé que un gran incendio forestal puede afectar a la masa, lo cual es más probable en la zona de los montes de Zuera que en los de Alcubierre.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que no debería llegarse ni a la mortalidad natural o física del árbol ni a su destrucción por incendio forestal. Tanto ambientalmente como económicamente es preferible una corta programada y planificada dentro de una gestión sostenible, asegurando su regeneración, que una corta tras incendio forestal. Por ello, es necesaria la aplicación de una selvicultura que establezca en el desarrollo de la misma las medidas necesarias que garanticen la conservación de la biodiversidad existente, e incluso que la favorezcan (como mantener en pie una serie de árboles con edades superiores al turno establecido).

Por supuesto, lo fundamental es tomar las medidas necesarias para asegurar la persistencia de la masa forestal y su regeneración natural. En estas masas naturales debe considerarse la repoblación solamente en casos extremos en los que no se consiga una adecuada regeneración.

1.3.6.4. Conclusión

A la vista de todo lo anterior, a la diversidad existente en el valor de algunas de las variables, así como en el relieve e insolación, y al abandono selvícola sufrido en las últimas décadas, se propone una ordenación por rodales, dadas las ventajas del método, cuya flexibilidad no compromete los objetivos de conservación del bosque y gestión sostenible, y permite incorporar los cambios del monte, del entorno social, económico y técnico sin restricciones por causa del método de ordenación. Con este método es posible incorporar

con libertad todo tipo de actuaciones de gestión, y a cualquier escala, dando realmente el protagonismo en la planificación al equipo planificador, y no al método de ordenación (González, *et al.*, 2006).

Debe, en cualquier caso, analizarse cuidadosamente el método de tratamiento de las cortas de regeneración que permitan poner en luz el suelo, tal y como exige el temperamento de esta especie, sin olvidarse de estudiar el riesgo de erosión (Madrigal, 1994). En este sentido se recomiendan cortas a hecho por bosquetes, de tamaño suficiente para que la regeneración sea adecuada y no se produzcan riesgos de erosión considerable.

1.4. Material y métodos

1.4.1. Datos de origen

Para la realización de los análisis de esta tesis se ha partido de los datos obtenidos en un inventario forestal ejecutado en las masas objeto de estudio durante los meses de octubre de 2001 a junio de 2002, llevado a cabo por el Servicio Provincial de Medio Ambiente de Zaragoza, para la realización del estudio “Caracterización de masas naturales de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en la depresión del Ebro”. El objetivo de este estudio era obtener información acerca de la situación actual de las masas naturales de *Pinus halepensis* en la zona más importante de la especie de la depresión del Ebro, en las provincias de Zaragoza y Huesca. Este trabajo se encuentra inédito (Cabanillas *et al.*, 2003), pudiéndose obtener información al respecto en Cabanillas *et al.* (2005) y en Notivol *et al.* (2005).

1.4.1.1. Diseño del inventario

Se diseñó un inventario con parcelas aleatoriamente distribuidas por la superficie a inventariar, con la restricción de que las coordenadas de dichas parcelas estuvieran situadas en las intersecciones de una malla cuadrada de 10 metros de lado. En la práctica se trató, pues, de un muestreo aleatorio sin reemplazamiento, con una densidad muestral de 1 parcela cada 20 hectáreas.

En cada punto de muestreo se replanteó una parcela circular de 13 metros de radio, correspondiente a una superficie de 530,93 m², en la que se midieron los parámetros que se

especifican más adelante. Excepcionalmente, cuando la densidad de arbolado y/o matorral no permitió el replanteo preciso de los límites de parcelas de ese tamaño por falta de visibilidad, impidiendo así la correcta evaluación de los parámetros de la masa, se replantearon parcelas circulares de 5,64 metros de radio, que corresponden a una superficie de 100 m².

En un primer momento la estratificación de la superficie a inventariar se realizó con la cartografía elaborada a partir de imágenes Landsat-5 TM mediante clasificación no supervisada multitemporal del área de pinar (15 de abril y 20 de julio de 1996), y análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), de 20 de julio de 1996, de la calidad de masa pinar denso (Baraza *et al.*, 2001). Sin embargo, resultó poco operativa en la práctica al detectarse ciertos decalajes y deformaciones respecto de las bases ortofotográficas disponibles, correspondientes al Sistema de Información Geográfica Oleícola Español, cuyas características se indican posteriormente. Una vez estudiadas estas diferencias y las posibilidades que ofrecían los materiales cartográficos de base, se estimó conveniente definir la superficie de muestreo como aquella que sobre la ortofotografía del vuelo oleícola aparecía como arbolada, por ser la más ajustada a la realidad física de los montes a muestrear.

Finalmente, para la estratificación de las distintas zonas de estudio se partió de los ortofotoplanos digitales del SIG oleícola realizado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Las características de estos planos son:

- Imagen de mapa de bits con tamaño de píxel de 1 metro de lado y 256 colores.
- Imagen ortorrectificada y georreferenciada en el elipsoide internacional de Hayford, proyección UTM y Datum ED1950 (mean).
- El tamaño de cada imagen individual es el de un dieciseisavo de las hojas 1:50.000 del Mapa Topográfico Nacional.
- Fecha de vuelo: finales de 1997.

El proceso de reclasificación se hizo como sigue:

- Unión de todas las imágenes de cada una de las dos zonas (Zuera y Alcubierre) para obtener una única imagen de cada zona.
- Análisis espacial de estas imágenes por estadística de vecindad (Neighborhood Statistics) con salida de píxel de 5x5 metros. La función de la estadística de vecindad es una función focal que crea una imagen de salida donde las celdas de salida son una función del valor en cada localización de las celdas de entrada. Para

cada celda en la trama de entrada, se calcularon los valores medios del valor de la celda de proceso y el valor de las celdas dentro de una vecindad especificada (en este caso 5x5), entonces se enviaron estos valores a la localización correspondiente de la celda en la trama de la salida.

- Las imágenes obtenidas en el punto anterior tienen un píxel de 5x5 metros con valores para cada píxel de 0 a 256. Como estos valores provienen de las medias de los píxeles vecinos se procedió a reclasificar la imagen y dar un valor entero a cada píxel y así obtener una imagen de 256 colores.
- Estas imágenes de 256 colores se reclasificaron en seis valores de 1 a 6, donde el valor 1 es el más oscuro y el valor 6 el más claro. Con este proceso se finalizó la nueva estratificación a partir de la escala de grises, creando una imagen estratificada de cada zona.
- Posteriormente, por intersección, se calculó el valor de esta imagen en cada parcela del inventario.

Así, finalmente, la estratificación se basó en la clasificación de 1 a 6 por escala de grises a partir del análisis de las ortofotos del Mapa Oleícola. Los valores de 1 a 4 incluyen de forma aproximada las áreas arboladas, mientras que los valores 5 y 6 reflejan una cubierta vegetal más rala, correspondiente a los matorrales y los cultivos. La nueva clasificación permite una mayor diferenciación por estratos al discriminar mejor las diferentes texturas, distinguiendo la mayor parte de la superficie en cuatro clases de grises (1, 2, 3 y 4) en vez de en los tres grupos mayoritarios que se obtenían con la estratificación inicial (0, 2 y 4).

1.4.1.2. Toma de datos

Las características generales del muestreo fueron las siguientes:

- Densidad de muestreo: 1 parcela cada 20 hectáreas, número de parcelas: 924.
- Intensidad de muestreo: 0,26%.
- Parcelas de muestreo circulares de radio 13 metros (parcelas de 5,309 áreas). Esta superficie se redujo a parcelas de 1 área cuando físicamente fue imposible replantear una parcela mayor, fundamentalmente por problemas de visibilidad.
- Diámetro normal mínimo inventariable (pies mayores): 7,5 cm (23,5 cm de perímetro).
- Regenerado: se caracterizó la presencia y/o abundancia de las tres clases de edad siguientes: diseminado (altura < 20 cm), repoblado (altura 20-100 cm) y monte bravo (altura > 100 cm), según abundancias en 8 sectores de superficie, la octava parte de

la parcela, aplicando índices de frecuencia de 0 a 3 (0: ausente, 1: presente, 2: frecuente, 3: abundante), por lo que el valor mínimo fue de 0 y el máximo de 24 para cada clase de edad.

- Un número máximo de nueve¹ árboles tipo por parcela, tomando los siguientes datos de cada uno de ellos:
 - Perímetro normal, en centímetros (con objeto de evitar realizar dos mediciones del diámetro en cruz).
 - Altura total, en metros.
 - Altura de la copa, en metros
 - Rectitud, según la siguiente clasificación:
 1. Totalmente recto.
 2. Ligeramente curvado, con curvatura inferior al diámetro normal (d) en el tercio superior.
 3. Ligeramente curvado, con curvatura inferior al d en la parte central del fuste o en la zona basal.
 4. Medianamente curvado, con curvatura inferior al d en la parte central y basal del fuste o en todo el árbol.
 5. Fuertemente curvado. Curvatura comprendida entre d y $2 \cdot d$.
 6. Torcido. Curvatura superior a $2 \cdot d$.
 - Inclínación, según la siguiente clasificación:
 1. Totalmente recto.
 2. Ángulo con respecto a la vertical inferior a 30° .
 3. Ángulo con respecto a la vertical entre 30° y 45° .
 4. Ángulo con respecto a la vertical mayor de 45° .
 - Ángulo de las ramas, según la siguiente clasificación:
 1. Inserción de ramas entre 60° y 90° .
 2. Inserción de ramas entre 30° y 60° .
 3. Inserción de ramas inferior a 30° .
 - Grosor de las ramas, según la siguiente clasificación:

¹ En los montes de Zuera se comenzó tomando nueve árboles como máximo; con estos datos se comprobó que la variabilidad era suficientemente baja para disminuir el número de muestra sin afectar a la precisión buscada, por lo que se redujo a cinco en los datos tomados en la Sierra de Alcubierre. El número de árboles tipo en cada parcela dependía del número de pies existentes en la misma.

1. Delgadas. Diámetro menor de $\frac{1}{4}$ del grosor del fuste en el punto de inserción.
 2. Medias. Diámetro entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del grosor del fuste en el punto de inserción.
 3. Gruesas. Diámetro superior a $\frac{1}{2}$ del grosor del fuste en el punto de inserción.
- Densidad de follaje/Defoliación, según la siguiente clasificación:
 1. Sin defoliación. La copa muy ligera e irregular, es poco densa y permite entrever el tronco y las ramas gruesas.
 2. Defoliación ligera. Defoliación poco intensa, pero suficiente para que pueda verse completamente el tronco y la ramificación principal. La defoliación se inicia en la parte central de la copa o también en la parte alta. Pueden aparecer fenómenos de microfilia y amarilleamiento, pero debido a esta clase de daños no son diferenciables de los causados por sequía.
 3. Defoliación media. La defoliación afecta más o menos intensamente a las acículas de dos años. Aparte del tronco, en la zona más defoliada se ven perfectamente las ramificaciones secundarias, que resaltan por el color claro de los ramillos. Son evidentes casos particulares de microfilia y amarilleamiento difuso. Presencia de ramillos muertos.
 4. Defoliación grave. Numerosas ramas muertas que continúan con las piñas viejas. El fuste y las ramificaciones (principal y secundaria) son perfectamente visibles. Los fenómenos de microfilia y amarilleamiento son más extensos.
 - Bifurcación, según la siguiente clasificación:
 1. No bifurcado.
 2. Bifurcación en el tercio superior de la altura del árbol.
 3. Bifurcación en el tercio central de la altura del árbol.
 4. Bifurcación en el tercio inferior de la altura del árbol.
 - Escala de vigor (dominancia apical), según la siguiente clasificación:
 1. Árboles con una guía terminal bien definida.
 2. Árboles con una guía poco definida o con grupo de guías.
 3. Árboles con la punta de copa más redondeada que apuntada.
 - Proyección de copa en las direcciones N-S y E-O, en metros.

- Número de piñas total, según la siguiente clasificación:
 1. 0 piñas.
 2. De 1 a 3 piñas.
 3. De 4 a 7 piñas.
 4. De 8 a 13 piñas.
 5. De 14 a 26 piñas.
 6. De 27 a 52 piñas.
 7. Más de 53 piñas.
- Número de piñas serotinas, con la misma escala que el dato anterior.
- Clasificación sociológica, según la siguiente clasificación:
 1. Dominante.
 2. Codominante.
 3. Dominado.
 4. Ahogado.
 5. Muerto.
- Número de anillos.
- Longitud del radio, en milímetros.
- Longitud del crecimiento correspondiente a los últimos 5 anillos.
- Longitud del crecimiento correspondiente a los últimos 10 anillos.
- Daños por muérdago (mínimo: 0, máximo: 6).

En total se midieron 5.287 árboles tipo, y aunque muchos de los datos reseñados no se han utilizado en la presente tesis, excepto para el capítulo 6, han servido para mejorar el conocimiento y caracterizar las masas de la zona.

Además, en cada parcela se midieron los siguientes datos:

Pendiente, en porcentaje.

- Exposición.
- Área basimétrica, en m²/ha (tras cálculo a partir del inventario de perímetros).
- Presencia de regueros:

- Intensidad, según la siguiente clasificación:
 1. Someros.
 2. Profundos.
 3. Cárcava.
- Abundancia, según la siguiente clasificación:
 0. Inexistentes.
 1. Poco abundantes.
 2. Abundantes.
 3. Muy abundantes.
- Presencia de raíces al aire, según la siguiente clasificación:
 0. Inexistentes.
 1. Poco abundantes.
 2. Abundantes.
 3. Muy abundantes.
- El porcentaje de cobertura del suelo por el matorral, según la siguiente clasificación:
 1. Cobertura del 0 al 25% de la superficie.
 2. Cobertura del 25 al 50% de la superficie.
 3. Cobertura del 50 al 75% de la superficie.
 4. Cobertura del 75 al 100% de la superficie.
- Indicios de pastoreo (verdadero o falso).
- Indicios de tratamientos selvícolas (verdadero o falso).
- Presencia de piñas en el suelo, según la siguiente clasificación:
 0. Inexistentes.
 1. De 0 a 3 piñas.
 2. De 4 a 10 piñas.
 3. Más de 10 piñas.
- Matorral:
 - Talla, según la siguiente clasificación:
 1. De 0 a 50 cm.

2. De 50 a 100 cm.
 3. De 100 a 150 cm.
 4. Mayor de 150 cm.
- Madurez, según la siguiente clasificación:
 1. Herbáceas (*Brachypodium*, *Stipa*), *Thymus*, *Artemisia*, *Phlomis*, *Arctostaphylos*.
 2. Matorral degradado Labiadas (*Rosmarinus*, *Lavandula*, *Salvia*), *Rhamnus lyciodes*.
 3. Matorral heliófilo de *Quercus coccifera*, *Rosmarinus officinalis*.
 4. Sotobosque con presencia de leguminosas y *Pistacia*, *Juniperus*.
 - Especies acompañantes: número de pies de *Juniperus thurifera*, *J. phoenicea*, *Quercus ilex* y *Q. faginea*.
 - Modelo de combustible.
 - Número de árboles secos.

En la Figura 1.24 se representa la zona de estudio (en la que se ha excluido el gran incendio de Zuera de 1995) con las parcelas de muestreo.

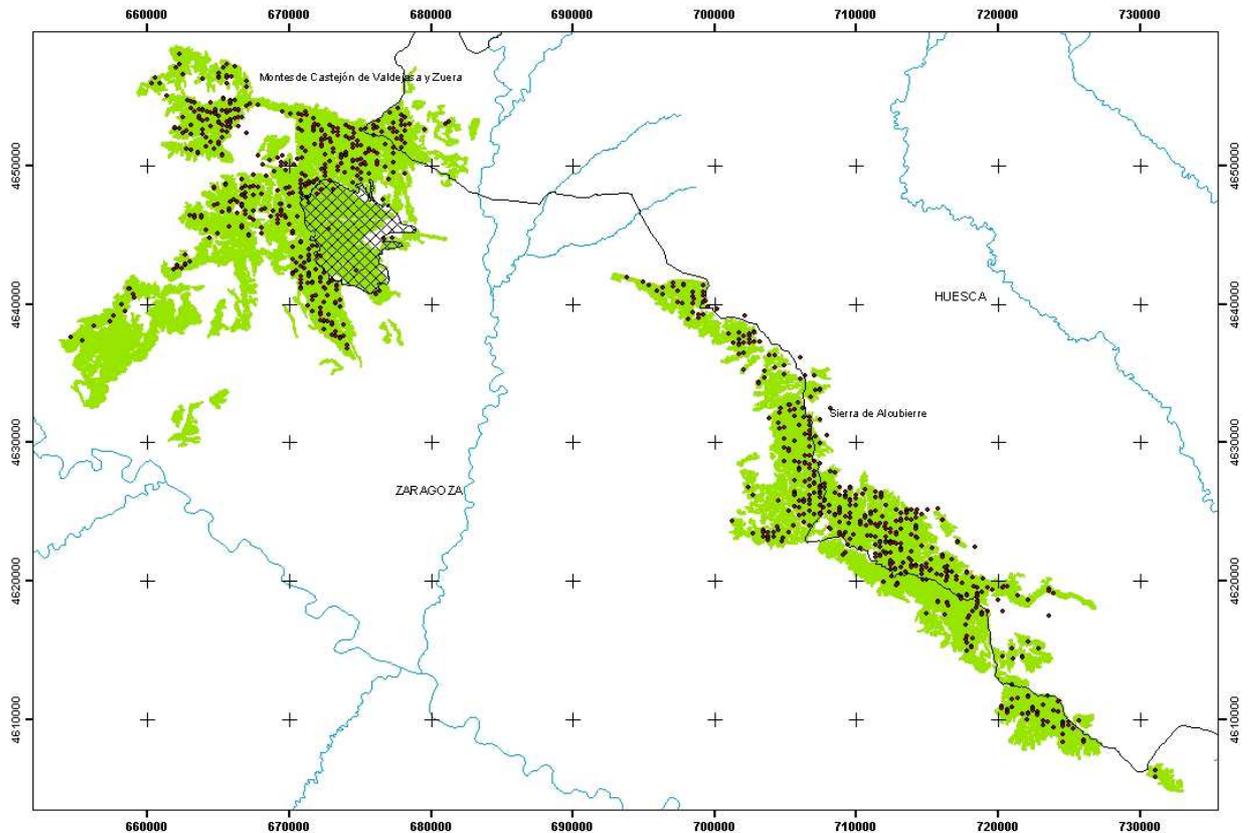


Figura 1.24. Masas naturales de *Pinus halepensis* en la zona de estudio y parcelas del muestreo (incendio 1995 de tramas).

1.4.2. Ampliación de datos

Durante los meses de febrero a abril de 2004 se apearon un total de 111 árboles distribuidos por toda la masa de estudio (aproximadamente la mitad en cada una de las dos grandes zonas), con objeto de disponer de los datos necesarios tanto para ajustar la función de perfil como para la realización de las curvas de calidad de esta tesis. Los árboles fueron seleccionados de tal forma que representaran las diferentes clases diamétricas existentes y en la misma proporción. Se cortaron en trozas de 1 metro y se midió la altura total del árbol (en m), la longitud de las trozas (en m), la altura del tocón (en cm), el perímetro (en m), el espesor de la corteza (dos mediciones en cruz, en mm) y el número de anillos, en cada una de las secciones.

1.4.3. Datos elaborados

En total, los datos utilizados en esta tesis han sido los correspondientes a 5.287 árboles tipo y 15.554 árboles a los que solamente se les había medido el perímetro, en las 924 parcelas del inventario, correspondiendo 2.168 árboles tipo y 485 parcelas a los montes de la zona de Alcubierre y 3.119 árboles tipo y 439 parcelas a los de la zona de Zuera.

En cuanto a las variables de parcela, se han calculado de la siguiente forma:

- El número de pies por hectárea (N) se ha estimado a partir de la relación entre el número de pies inventariables por parcela (Np) y la superficie de ésta (Sp , en m^2):

$$N = \frac{Np}{Sp} \cdot 10.000 \quad (\text{ec.1.1})$$

- El diámetro medio cuadrático (d_g , en cm) es el diámetro normal del árbol que representa el promedio del área basimétrica de la parcela, y se ha calculado mediante la fórmula:

$$d_g = 100 \cdot \sqrt{\frac{G \cdot 4}{N \cdot \pi}} \quad (\text{ec.1.2})$$

- El área basimétrica (G , en m^2/ha) es la suma de las secciones normales de todos los árboles inventariables de la parcela, y su expresión es la siguiente:

$$G = \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot \frac{10.000}{Sp} \quad (\text{ec.1.3})$$

siendo d_i el diámetro normal de cada árbol inventariable en cm y Sp la superficie de la parcela en m^2 .

- El diámetro dominante (D_0 , en cm) es la media del diámetro normal de los 100 árboles por hectárea más gruesos, y su expresión es la siguiente:

$$D_0 = \frac{\sum_{i=1}^j d_{0i}}{j} \quad (\text{ec.1.4})$$

donde d_{0i} es el diámetro del árbol dominante i y j el número de árboles dominantes de cada parcela, cuyo número varía según el tamaño de la parcela, siendo de cinco árboles para las parcelas de 530,93 m² (736 parcelas, 378 en Alcubierre y 358 en Zuera) y uno para las de 100 m² (188 parcelas, 107 en Alcubierre y 81 en Zuera), correspondiendo en total a 3.868 árboles dominantes (1.997 en Alcubierre y 1.871 en Zuera). Pero en realidad resultaron medidos 3.537 árboles dominantes (1.800 en Alcubierre y 1.737 en Zuera), algo menos de lo previsto, debido a que en algunas parcelas el número de árboles existentes no alcanzaba a los cinco previstos por la baja densidad de arbolado.

- La altura media (H_m , en m) es el promedio de las alturas totales de los árboles tipo de la parcela:

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^k h_i}{k} \quad (\text{ec.1.5})$$

donde h_i es la altura del árbol i y k el número de árboles tipo de la parcela.

- La altura dominante (H_0) es la media de la altura total de los 100 árboles por hectárea más gruesos, y su expresión es la siguiente:

$$H_0 = \frac{\sum_{i=1}^j h_{0i}}{j} \quad (\text{ec.1.6})$$

donde h_{0i} es la altura total del árbol dominante i y j el número de árboles dominantes de cada parcela, cuyo número varía según el tamaño de la parcela, siendo de cinco árboles para las parcelas de 530,93 m² y uno para las de 100 m²,

siempre y cuando la densidad fuera suficiente para que existiera este número de árboles en la parcela.

Sin embargo, la altura dominante no fue una variable a medir en el inventario del que se han obtenido los datos para los análisis de esta tesis, por lo que fue necesaria su estimación posterior en una parte de las parcelas, resultando que del total de árboles dominantes existentes en el inventario, 3.537, se contaba con datos reales de altura total para 1.887, el 53% de ellos, ya que coincidían con árboles tipo medidos, de los cuales 795 correspondieron a Alcubierre (el 44 % de los que le corresponden) y 1.092 a Zuera (el 63%). Por este motivo fue necesaria la estimación de la altura de un 47% de los árboles dominantes, tal y como se explica en el Capítulo 2 de esta tesis.

- La edad (t) se ha calculado como la suma del número de anillos a 1,30 m, obtenido mediante extracción de probetas de madera con barrena de Pressler, más 15, que es el número de años estimado para alcanzar la altura de 1,30 (obtenido con una muestra de 100 árboles de los que fueron apeados y cortados en trozas de 1 m de longitud).
- El volumen con corteza (V_m), medido en metros cúbicos por hectárea, se ha calculado con la suma de los volúmenes de todos los árboles de la parcela. Para ello se ha cubicado cada árbol mediante la función de perfil obtenida en el Capítulo 4 de esta tesis, correspondiente al modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995), con los parámetros obtenidos para cada una de las zonas. Dado que de los 15.579 árboles sólo se disponía de la altura real en 5.286 de ellos, se ha estimado para el resto la altura mediante la fórmula de Sloboda *et al.* (1993) Mod. obtenida en el Capítulo 2 de esta tesis, con los parámetros correspondientes a cada una de las zonas.

Finalmente la expresión del volumen, en m³/ha, es la siguiente:

$$V_m = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \frac{10.000}{Sp} \quad (\text{ec.1.7})$$

siendo V_i el volumen de cada árbol inventariable en m³ y Sp la superficie de la parcela en m².

- Índice de Hart-Becking, es un índice que expresa la espesura en función de la separación media entre pies y la altura de los mismos, y se define como la tangente del ángulo que forman el fuste de un árbol y la línea trazada desde su ápice hacia la base de un árbol situado a una distancia equivalente al espaciamiento medio entre pies (Serrada, 1995). A la hora de aplicarlo a una masa y definir un valor para la misma se emplea la altura dominante y como separación entre pies la que resulta de suponer una distribución de los árboles sobre el terreno según una malla hexagonal o una malla cuadrada, observándose diferentes valores del índice dependiendo de que se considere una u otra distribución. En general, se estima que las masas naturales se aproximan más a una distribución al tresbolillo que a una en malla cuadrada (Schütz, 1990; Serrada, 1997), por lo que en este trabajo se adopta la expresión del índice que corresponde a la distribución al tresbolillo:

$$IH = \frac{\sqrt{\frac{20.000}{N \cdot \sqrt{3}}}}{H_0} \cdot 100 \quad (\text{ec.1.8})$$

donde IH es el índice de Hart-Becking en %, N es el número de pies por hectárea y H_0 la altura dominante en metros.

1.4.4. Análisis estadísticos de los ajustes

Dado que la mayor parte de los modelos ensayados no son lineales en los parámetros, la estimación de los mismos se ha realizado por regresión no lineal empleando el procedimiento iterativo de Gauss-Newton (Hartley, 1961). Como valores inicializadores de los parámetros en la iteración se han empleado los obtenidos por diferentes autores según los casos (que se indican en los Capítulos correspondientes).

Para poder realizar la comparación entre los diferentes modelos se han calculado para cada uno de ellos los siguientes estadísticos: la raíz del error medio cuadrático ($REMC$), que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), que refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo y que tiene en cuenta el número total de parámetros a estimar. Un modelo será mejor que otro si se obtienen menores valores de $REMC$ y mayores de R^2_{Adj} . Sus expresiones matemáticas son las siguientes:

Raíz del error medio cuadrático: $REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - p}}$ (ec.1.9)

Coefficiente de determinación ajustado: $R_{Adj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \left(\frac{N-1}{N-p} \right)$ (ec.1.10)

donde Y_i , \hat{Y}_i y \bar{Y}_i , son los valores observado, predicho y promedio respectivamente, N el número de datos utilizados en el ajuste y p el número de parámetros del modelo.

También se ha calculado el criterio de información de Akaike (AIC), que permite elegir entre modelos con diferente número de parámetros y que se basa en minimizar la distancia de Kullback-Liebler (Burnham y Anderson, 1998). Un modelo será mejor que otro si obtiene un menor valor de este índice. Su expresión es la siguiente:

$$AIC = N \cdot \ln \hat{\sigma}_j^2 + 2 \cdot K_j \quad (\text{ec.1.11})$$

donde $\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}$ y K_j es el número de parámetros del modelo j más 1 ($K_j = p_j + 1$) y $\hat{\sigma}_j^2$ es el estimador de la varianza del error del modelo j .

Cuando existe correlación entre las variables regresoras los estimadores de los parámetros son insesgados, pero presentan errores estándar elevados. Este problema es conocido como colinealidad o multicolinealidad, y para evitarlo es necesario encontrar qué variables están relacionadas, lo que puede hacerse con la matriz Jacobiana de los autovalores de los parámetros, pero no resulta sencillo su observación cuando el número de parámetros es elevado. Para poder determinar entonces si existe correlación entre las diferentes variables independientes de cada uno de los modelos se ha analizado la presencia de colinealidad entre las mismas mediante el índice de condición máximo (IC), que está basado en las aproximaciones de Belsey *et al.* (1980), y cuya expresión matemática es la siguiente:

$$IC(R) = \left(\frac{\text{máximo autovalor de } R}{\text{mínimo autovalor de } R} \right)^{\frac{1}{2}} > 1 \quad (\text{ec.1.12})$$

donde R es la matriz de correlaciones entre las variables independientes del modelo.

Cuando todas las variables son ortogonales, todos los autovalores son iguales a 1, mientras que cuando existe un alto grado de correlación entre variables, algún autovalor es próximo a cero, con lo que el valor del índice de condicionamiento se dispara. En general se asume que si $1 < IC(R) < 10$ no hay multicolinealidad, si $10 \leq IC(R) \leq 30$ hay un problema moderado de multicolinealidad, y si $IC(R) > 30$ hay un problema grave de multicolinealidad (Belsey, 1991; Peña, 1995).

1.4.5. Evaluación de los modelos

Una vez realizado el ajuste de un modelo es necesario realizar su validación utilizando un conjunto de datos independientes, ya que la calidad del ajuste no refleja necesariamente la calidad de la predicción. Existen numerosas metodologías para realizar la validación de modelos, aunque no hay ninguna estándar que sea universalmente aceptada.

Es usual la fragmentación de la muestra de datos usados en dos partes de distintas proporciones (siendo normal emplear el 75% de los mismos para el ajuste y el 25% para la validación). Sin embargo, Huang *et al.* (2003) no aconsejan este procedimiento, ya que: (1) supone un sacrificio de una parte de los datos para la validación (25%), cuando la fase más importante debería ser la del ajuste; (2) el conjunto de datos reservados para la validación no son realmente independientes y, por lo tanto, el ajuste con estos datos no está realmente validando el modelo. Esta metodología es poco consistente para muestras pequeñas, y para que los datos fueran aproximadamente independientes la división de los mismos debería basarse en parcelas con características homogéneas, apoyándose en una estratificación previa en función de la edad, densidad, etc., en vez de tener en cuenta árboles individuales como se hace habitualmente (Barrio *et al.*, 2004).

Otro procedimiento frecuentemente utilizado en la validación de modelos en el ámbito forestal es aquel que se basa en el empleo de los residuos eliminados, que son los

obtenidos para cada árbol al ajustar el modelo a todas las observaciones excepto a las de dicho árbol. Este procedimiento se denomina validación cruzada por árbol (*leave-one-tree-out-cross validation*, Bi, 2000), y consiste en calcular con estos residuos los mismos estadísticos que los obtenidos para la fase de ajuste.

Recientemente (Huang, 2002; Kozak y Kozak, 2003) han puesto en duda que los estadísticos basados en los residuos de validación, bien sean estos procedentes de la división aleatoria del conjunto de datos o de validación cruzada, proporcionen alguna información adicional comparativamente para el conjunto de estadísticos calculados para el ajuste. La cuestión relevante es hasta cuánto mayor puede ser el estadístico de la validación para ser considerado aceptable, y aunque muchos investigadores han considerado este hecho no ha habido una respuesta simple (Huang *et al.*, 2003). Debido a las consideraciones apuntadas por estos autores no se ha realizado validación estadística de los modelos.

1.4.5.1. Evaluación gráfica

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, una vez elegidos los modelos de ajuste más adecuados es conveniente comprobar si responden adecuadamente a lo esperado, y para ello la información gráfica es una herramienta muy adecuada. Las salidas gráficas pueden mostrar rápidamente la bondad de la predicción del modelo y son uno de los métodos más efectivos para su evaluación, aunque tienen la desventaja de que pueden ser subjetivos algunas veces, ya que distintas personas pueden sacar conclusiones diferentes al no basarse en medidas cuantitativas (Huang, 2002).

Existen diferentes tipos de gráficos que son frecuentemente utilizados para examinar la bondad de las predicciones, como son:

- Forma de las curvas o de los haces de curvas.
- Gráfico de los valores observados frente a los valores predichos.
- Gráficos de residuos frente al valor predicho de la variable dependiente y frente a los valores observados de las variables independientes.
- Gráfico del valor predicho y observado de la variable dependiente frente al tiempo (en modelos que incluyen la edad o con medidas repetidas).
- Gráfico de las curvas ajustadas superpuestas con los datos de ajuste o validación.

Algunos de los estadísticos empleados en el ajuste también deben ser analizados gráficamente. En este sentido, es muy interesante estudiar la evolución del error medio cuadrático por clases de la(s) variable(s) independiente(s).

Este tipo de gráficos permite verificar de una forma rápida el cumplimiento de la mayoría de las hipótesis estructurales del análisis de regresión, y también detectar la existencia de sesgos o tendencias sistemáticas en los residuos, que causarían malas estimaciones de los modelos.

En esta tesis se van a realizar, en definitiva, validaciones gráficas de los ajustes.

1.4.6. Comparación entre zonas

Se ha planteado también, como objetivo secundario, la necesidad de analizar si es posible aplicar modelos únicos para las dos zonas estudiadas. Esto se justifica en las diferencias encontradas entre ambas zonas en algunas de las variables investigadas en anteriores trabajos (Cabanillas *et al.*, 2003; Notivol *et al.*, 2005). Entre las variables analizadas no sólo se incluían las habituales de carácter dasométrico y selvícola, sino también una serie de parámetros referentes a caracteres morfológicos y adaptativos que contribuyen al conocimiento de la variación genética existente. Entre las primeras se encontraron diferencias significativas en la altura total, el perímetro, el crecimiento en los últimos 10 y 5 años, la edad y la fracción de cabida cubierta, y entre las segundas en la altura y dimensiones de copa, la rectitud y el ángulo de inclinación del fuste, la dominancia apical y el grosor y tipo de bifurcación de las ramas. Además se encontraron diferencias en caracteres sanitarios como el grado de defoliación y el índice de afección por muérdago. El diferente régimen de incendios que presentan ambas zonas, jugando éstos un papel muy destacado en la zona de Zuera y condicionando así su gestión, indican a priori diferencias entre las masas. También sus diferencias fisiográficas, sobre todo orientaciones y pendientes que conforman el relieve, geológicas, edáficas e incluso climáticas, parecen indicar lo mismo.

Así, los análisis de los primeros capítulos (relación altura-diámetro generalizada, distribuciones diamétricas y funciones de perfil) se han realizado tanto para los datos combinados (TOTAL) como para el conjunto de datos de cada zona por separado (ALCUBIERRE y ZUERA). Posteriormente, vistos los resultados obtenidos en este apartado para estas relaciones, se ha optado por no continuar con esta separación para los dos siguientes capítulos (calidad de estación y modelos de crecimiento y producción).

Para comprobar si existen diferencias entre las dos zonas estudiadas se ha usado el test F (Bates y Watts, 1988). Este método requiere ajustar los llamados modelos completo y reducido, respectivamente, y se ha empleado frecuentemente para valorar si son necesarios distintos modelos para una especie que crece en diferentes zonas o regiones (p.e. Huang *et al.*, 2000; Peng *et al.*, 2001; Calama y Montero, 2004; Castedo *et al.*, 2005). El modelo reducido tiene en cuenta el mismo conjunto de parámetros para las dos zonas. En cambio, el modelo completo considera conjuntos diferentes de parámetros para cada zona. Para su obtención se expande cada parámetro incluyendo una variable *dummy* para diferenciar las zonas y un parámetro asociado, tal y como se expresa a continuación:

$$\beta_i + \gamma_i I \quad i = 0, 1 \quad (\text{ec.1.13})$$

donde β_i es un parámetro del modelo reducido; γ_i es el parámetro asociado del modelo completo e I es una variable *dummy* que es igual a 0 para Alcubierre e igual a 1 para Zuera.

La igualdad entre el modelo completo y el modelo reducido se ha analizado mediante el test F , considerando la hipótesis nula de que los parámetros de los modelos de cada una de las zonas sean iguales frente a la hipótesis alternativa de que sean distintos. Dicho test tiene la siguiente expresión:

$$F = \frac{SSE_R - SSE_C}{df_R - df_C} \div \frac{SSE_C}{df_C} \quad (\text{ec.1.14})$$

donde SSE_R es la suma de cuadrados del error del modelo reducido, SSE_C es la suma de cuadrados del error del modelo completo, y df_R y df_C son los grados de libertad del modelo reducido y completo, respectivamente.

El test F sigue una distribución F y la regla de decisión es la siguiente: si el valor del test F es mayor que el $F_{\text{crítico}}(1 - \alpha; df_R - df_C; df_C)$ se rechaza la hipótesis nula; en caso contrario se acepta. Si los resultados revelan que no hay diferencias en la predicción entre las ecuaciones de las dos zonas, será suficiente un único modelo ajustado sobre el conjunto global de datos. Sin embargo, si los resultados del test revelan que hay diferencias entre las ecuaciones, será necesario aplicar dos modelos diferentes, uno para cada zona.

Aunque el test F pueda revelar diferencias significativas entre las dos ecuaciones, los gestores pueden estar interesados en conocer las consecuencias prácticas de mezclar incorrectamente las ecuaciones de cada zona, o bien las de aplicar una única ecuación a las dos zonas (ecuación obtenida con los datos combinados). Para ello se ha calculado el incremento en la $REMC$ (Δ_{REMC}) (Corral-Rivas *et al.*, 2007), que permite tener una idea de los beneficios de usar una ecuación distinta en cada zona en términos de un error medio en la predicción del modelo. El Δ_{REMC} se ha calculado como se expresa a continuación:

$$\Delta_{REMC}(\%) = \frac{REMC_E - REMC_C}{REMC_C} 100 \quad (\text{ec.1.15})$$

donde $REMC_C$ y $REMC_E$ son el $REMC$ calculado con la ecuación seleccionada cuando se usan las ecuaciones para cada zona (Alcubierre y Zuera) correcta (con sus parámetros) y erróneamente (con los parámetros del total o de la otra zona), respectivamente.

1.5.- Bibliografía

- Abbas, H. (1983) Contribution à l'étude de la regeneration naturelle du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans les pinèdes incendiées du Departement des Bouches-du-Rhone (1973-1979). Diplomes d'études approfondis. Université d'Aix. Marseille III.
- Abbas, H. (1986) La productivité des forêts de Pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyses écodendrométriques. Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, 127-156.
- Abelló, M.A. (1988) Historia y evolución de las repoblaciones forestales en España. Colección Tesis Doctorales, 126/88. Editorial de la Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Acherar, M. (1981) La colonisation des friches par le pin d'alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans les basses garrigues du montpellierais. Thèse de 3ème cycle. Université Sciences et Techniques du Languedosc., Montpellier.
- Acherar, M., Lepart, J. y Debussche, M. (1984) Colonization of old fields by Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in the Mediterranean Languedoc. Acta Oecologica, Oecologia Plantarum, 5(2), 179-189.
- Alejano Monje, M.R., Martínez Montes, E. y Tíscar, A. (2000) Selvicultura en masas protectoras de pino carrasco en la cuenca del Guadiana Menor (provincias de Granada y Jaen). Objetivos y criterios de gestión. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 10, 111-116.
- Alía, R., Galera, R. y Martín, S. (1999) Mejora genética y masas productoras de semilla de los pinares españoles. Monografías INIA. Serie Forestal N° 1.
- Alía, R., Martín, S., Agúndez, D. y Gómez Garay, A. (2000) La mejora genética del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 10, 19-27.
- Allué, J.L. (1990) Atlas Fitoclimático de España. Taxonomías. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 221 pp.
- Baraza, C., Casterad, M.A. y Notivol, E. (2001) Teledetección en un programa de mejora genética forestal de *Pinus halepensis* Mill. III Congreso Forestal Español, Granada, Mesa 3, ponencia 39.
- Barrio, M., Álvarez González, J.G., Díaz-Maroto, I. y López Sánchez, C. (2004) Relación altura-diámetro generalizada para *Quercus robur* L. en Galicia. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 18, 141-146.

- Barrio, M. y Álvarez, J.G. (2005) Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stand and its use in designing schedules. *Forestry* 78(3), 209-216.
- Bates, D.M. y Watts, D.G. (1988) *Nonlinear regression analysis and its applications*, John Wiley & Sons, New York.
- Bedel, J. (1986) Aménagement et gestion de peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. *Serie Etudes C.I.H.E.A.M* 86/I: 109-125.
- Belghazi, B., Ezzahiri, M. y Romane, F. (2000) Productivity of natural stands of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller) in the Tamga forest (High Atlas, Morocco). *Cahiers Agricultures*, 9(1), 39-46.
- Belsey, D.A. (1991) *Conditioning diagnostics, collinearity and weak data in regression*. John Wiley & Sons, New York, 396 p.
- Belsley, D.A., Kuh, E. y Welsch, R.E. (1980) *Regression Diagnostics*, New York: Wiley.
- Bi, H. (2000) Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalypts. *Forest Science*, 46(3), 397-409.
- Blanco, E., Casado, M.A., Costa, M., Escribano, R., García, M., Genova, M., Gómez, A., Gómez, F., Moreno, J.C., Morla, C., Regato, P. y Sainz, H. (1997) *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Planeta, Barcelona.
- Bolós, O.d., y Vigo, J. (1984) *Flora del paísos catalans*. Editorial Barcino, Barcelona.
- Braun-Blanquet, J. y Bolos, O.d. (1957) Les groupements végétaux du bassin moyen de l'Èbre et leur dynamisme. *Anales de Aula Dei*, 5 (1-4), 1-266.
- Broncano, M.J. (1999) *Patrones observados y factores que determinan la variabilidad espacio-temporal de la regeneración de pino carrasco (Pinus halepensis Mill.) después de un incendio*. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Burk, T.E., y Burkhart, H.E. (1984) *Diameter distributions and yields of natural stands of loblolly pine*. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI and SU. Publication No. FSW-1-84.
- Burnham, K.P. y Anderson, D.R. (1998) *Model selection and inference: a practical information-theoretic approach*. Springer-Verlag, New York.
- Cabanillas, A., Notivol, E., González, R. y Revuelta, R. (2003) *Caracterización de las masas naturales de pino carrasco (Pinus halepensis Mill.) en la depresión del Ebro*. Servicio Provincial de Medio Ambiente de Zaragoza. Gobierno de Aragón (inédito).
- Cabanillas, A., Notivol, E., González, R. y Revuelta, R. (2005) *Diseño del inventario para caracterización de masas naturales de pino carrasco (Pinus halepensis Mill.) en la depresión del Ebro*. V Congreso Forestal Español, Zaragoza.

- Cabrera, M. (2003) Incidencia de la regeneración natural en los proyectos de ordenación de montes. Actas de la III Reunión sobre regeneración natural y IV reunión sobre ordenación de montes. Cuadernos de la S.E.C.F., 15, 25-36.
- Calama, R. y Montero, G. (2004) Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. *Canadian Journal Forest Research* 34, 150-163.
- Cámara, A. (2001) Temperamento, aptitud y aplicaciones del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en España. Análisis mediante un S.I.G. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 357 p.
- Camarero, J.J., Lloret, F., Corcuera, L., Peñuelas, J. y Gil-Pelegrín, E. Cambio global y decaimiento del bosque. En: Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 397-423. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.
- Cao, Q.V., Burkhart, H.E., y Lemin, R.C. (1982) Diameter distributions and yields of thinned loblolly pine plantations. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI and SU. Publication No.FSW-1-82.
- Castedo, F., Barrio, M., Parresol, B.R. y Álvarez González, J.G (2005) A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). *Annals of Forest Science*, 62(5), 455-465.
- Castellani, C., Ghidini, G. y Tosi, V. (1980/82) Tavole dendrometriche ed alsometrica del pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Mill.) valesvoli in Italia. *Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura* (8), 3-44.
- Ceballos, L. y Ruiz de la Torre, J. (1971) Árboles y arbustos de la España Peninsular. Sección Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid.
- Cervera, J.M. (1996) Segundo Inventario Forestal Nacional. 1986-1995. Aragón. Zaragoza. M.A.P.A. Dirección General de Conservación de la Naturaleza.
- Ciancio, O. (1986) Sylviculture du Pin d'Alep. Options Méditerranéennes. Serie Etudes C.I.H.E.A.M 86/I: 47-54.
- CIHEAM (1986) Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, I-V.
- Corral-Rivas, J.J., Barrio-Anta, M., Aguirre-Calderón, O.A., Diéguez-Aranda, U. (2007) Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry*, 80: 29-40.
- Costa, J.M., Ramírez, J.I. y Salazar, A. (1998) Mapa Geológico de España, Hoja 356 Lanaja, escala 1:50.000. Instituto Tecnológico Geominero de España.

- Couhert, B. y Duplat, P. (1993) Le Pin d'Alep. In Recontre Forestiers-Chercheurs en Forêt Méditerranée. La Grande Motte (34), 6-7 octobre 1993. Ed INRA, Les Coloques, 63:12-147.
- Creus, J. (1998) Ecología de Los Monegros. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Centro de Desarrollo de Monegros. Daskalakou, E.N. y Thanos, C.A. (1996) Aleppo Pine (*Pinus halepensis*) Postfire Regeneration: The Role of Canopy and Soil Seeds Banks. The International Journal of Wildland Fire, 6, (2), 59-66.
- Daskalakou, E.N., y Thanos, C.A. (2004) Postfire regeneration of Aleppo pine - the temporal pattern of seedling recruitment. Plant Ecology, 171(1-2), 81-89.
- De Las Heras, J., López, R., Gómez, E., Corcoles, D., Alfaro, H. y Ferrandis, P. (1997) Efecto de un fuego controlado sobre la diseminación y viabilidad de semillas de *Pinus halepensis* Millar. En: F. Puertas Tricas y M. Rivas (eds), Actas del I Congreso Forestal Hispano-Luso y II Congreso Forestal Español IRATI-97, Pamplona, V: 139-142.
- De las Heras, J., Moya, D., López-Serrano, F., y Condes, S. (2007) Reproduction of postfire *Pinus halepensis* Mill. stand six years after silvicultural treatments. Annals of Forest Science, 64(1), 59-66.
- Demchik, M. C. y W. E. Sharpe. (2000) The effect of soil nutrition, soil acidity and drought on northern red oak (*Quercus rubra* L.) growth and nutrition on Pennsylvania sites with high and low red oak mortality. Forest Ecology and Management, 136, 199-207.
- D.G.A. (2000) Mapa Forestal de Aragón. (Inédito). D.G.A. Dirección General de Medio Natural.
- Erviti, J.J. (1991) Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 319 p.
- Eснаоla, J.M. y Gil, C. (1998) Mapa Geológico de España, Hoja 355 Leciñena, escala 1:50.000. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Franz, F. y Forster, H. (1980) Table de production de pin d'Alep pour les Aurés - Algeria. Chaire de la Production Forestière de l'Université de Munich. Forschungsvonhaben in Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit, Bonn.
- Gandullo, J.M., Nicolas, A., Sánchez, O. y Moro, J. (1972) Ecología de los pinares españoles. III *Pinus halepensis* Mill. INIA. 310 p.
- Gandullo, J.M. y Serrada, R. (1977) Mapa de Productividad Potencial. I.N.I.A.

- Garitacelaya, J. (2003) La percepción de la regeneración natural y los síntomas de un nuevo paradigma silvícola. Actas de la III Reunión sobre regeneración natural y IV reunión sobre ordenación de montes. Cuadernos de la S.E.C.F., 15, 17-24.
- García, L. y De Palacios, P. (2000) La madera del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 10, 51-55.
- Gil, L., Díaz-Fernández, P.M., Jiménez, M.P., Roldán, M., Alía, R., Agundez, D., de Miguel, J., Martín, S. y de Tuero, M. (1996) Las regiones de procedencia de *Pinus halepensis* Mill. en España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Madrid.
- González Molina, J.M., Piqué Nicolau, M. y Vericat Grau, P. (2006) Manual de ordenación por rodales. Gestión multifuncional de los espacios forestales. Centre Tecnològic de Catalunya.
- González-Ochoa, A.I., López-Serrano, F. y De las Heras, J. (2004) Does post-fire forest management increase tree growth and cone production in *Pinus halepensis*? Forest Ecology and Management, 188(1-3), 235-247.
- Guerra, A., Guitián, F., Paneque, G., García, A., Sánchez, J.A., Monturiol, F. y Mudarra, J.L. (1966) Mapa de Suelos de España. C.S.I.C.
- Hartley, H.O. (1961) The modified Gauss-Newton method for the fitting of nonlinear regression functions by least squares. Technometrics, 3, 269-280.
- Herranz, J.M. (2000) Aspectos botánicos y ecológicos del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 10, 13-17.
- Herranz Sanz, J.M., Martínez-Sánchez, J.J., Marín, A., y Ferrandis, P. (1997) Postfire regeneration of *Pinus halepensis* in a semi-arid area in Albacete province (southeastern Spain). Ecoscience, 4(1), 86-90.
- Huang, S., Price, D. y Titus, S.J. (2000) Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. Forest Ecology and Management, 129, 125-141.
- Huang, S. (2002) Validating and localizing growth and yield models: procedures, problems and prospects. IUFRO congress "Reality, models and parameter estimation- the forestry scenario", Sesimbra, Portugal. 29 p.
- Huang, S., Yang, Y. y Wang, Y. (2003) A critical look at procedures for validating growth and yield models. CAB International 2003. Modelling Forest Systems (eds A. Amaro, D. Reed and P. Soares).
- Klepac, D. (1986) Le pin d'Alep en Dalmatie. Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, 29-42.
- Knoebel, B.R., Burkhart, H.E., y Beck, D.E. (1986) A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar. Forest Science, Monograph 27, 62 p.

- Kotze, H. (2003) A strategy for growth and yield research in pine and eucalipt plantations in Komatiland Forest in South Africa. In: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), Modelling Forest Systems. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK, pp.75-84.
- Kozak, A. y Kozak, R. (2003) Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? Canadian Journal Forest Research, 33, 976-987.
- Laguna, M. (1993) Flora forestal española. Galicia Editorial S.A., La Coruña.
- Lamont, B.B., Le Maitre, D.C., Cowling, R.M. y Enright, N.J. 1991. Canopy seed storage in woody plants. Botanical Reviews 57, 277-317
- Lavi, A., Perevolotsky, A., Kigel, J., y Noy Meir, I. (2005) Invasion of *Pinus halepensis* from plantations into adjacent natural habitats. Applied Vegetation Science, 8(1), 85-92.
- Llobet, S., Navascués, P. y Riera, J. (2002) Documento sobre la silvicultura de pino carrasco (*Pinus halepensis*). Jornadas sobre silvicultura de pino carrasco. Diputación Provincial de Barcelona (inédito).
- LLobet, S. (2008) Propuesta de modelo silvícola para montes de pino carrasco (*Pinus halepensis*) Simposio de silvicultura mediterránea en montes privados. Diputación Provincial de Barcelona. Colección de documentos de Trabajo, Serie Territorio nº5, pp.109-144.
- M.A. (1960) Estadística Forestal de España. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Montes. Publicaciones del Servicio de Estadística.
- M.A. (1965) Estadística Forestal de España. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura.
- M.A. (1966) Estadística Forestal de España. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura.
- M.A. (1967) Estadística Forestal de España. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura.
- M.A. (1970) Estadística Forestal de España. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura.
- M.A. (1971) Estadística Forestal de España. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura.
- Madrigal, A. (1994) Ordenación de Montes arbolados. ICONA Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Colección Técnica. 375 p.
- M.A.P.A. (1969) Primer Inventario Forestal Nacional. Cuaderno Provincial Nº 50 - Zaragoza. Ministerio de Agricultura. I.C.O.N.A.

- M.A.P.A. (1970) Primer Inventario Forestal Nacional. Cuaderno Provincial N° 22 - Huesca. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Montes, Caza y Pesca fluvial.
- M.A.P.A. (1974) Anuario de Estadística Agraria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (1975) Anuario de Estadística Agraria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (1995) Anuario de Estadística Agraria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (1996) Anuario de Estadística Agraria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (1997) Anuario de Estadística Agraria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (1999) Anuario de Estadística Agroalimentaria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (2002) Anuario de Estadística Agroalimentaria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.A.P.A. (2003) Anuario de Estadística Agroalimentaria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- M.M.A. (2006) La Red Europea de daños en los Bosques, Nivel I. Página web del Ministerio de Medio Ambiente.
- Martín Bolaños, M. (1947) Ensayo de investigación indirecta sobre origen, desarrollo y producciones del monte alto. IFIE, Año XVIII, nº 34, Madrid.
- Montero de Burgos, J.L., González Rebollar, J.L., García Salmeron, J. y Serrada, R. (1981) Restauración de espacios naturales degradados. Forestación y Reforestación. En: Tratado del Medio Natural Tomo IV. UPM, CEOTMA; ICONA. Madrid.
- Montero, G., Grau, J.M., Ruiz-Peinado, R., Ortega, C. y Cañellas, I. (2000) Tablas de producción para *Pinus halepensis* Mill. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 10, 183-188.
- Montero, G., Cañellas, I. y Ruiz-Peinado, R. (2001) Growth and Yield Models for *Pinus halepensis* Mill. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales, 10 (1), 180-201.
- Montero, G., Alonso, A. y Ruíz-Peinado, R. (2002) Cuantificación del potencial de las principales especies españolas para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo. En: Bosques, sociedad y cambio climático. Universidad Internacional Menéndez Pelayo. 23 p.

- Montero, G., Ruíz-Peinado, R. y Muñoz, M. (2005) Producción de Biomasa y fijación de CO₂ para los bosques españoles. Monografías INIA: Serie Forestal nº 13.
- Nahal, I. (1962) Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill).- Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. Annales de la Station de Recherches et Expérimentations Forêstieres et de l'Ecole Nationale de Eaux et orêts. Nancy.
- Nathan, R., Safriel, U.N., Noy Meir, I., y Schiller, G. (2000) Spatiotemporal variation in seed dispersal and recruitment near and far from *Pinus halepensis* trees. *Ecology*, 81(8), 2156-2169.
- Nathan, R., y Ne' eman, G. (2004) Spatiotemporal dynamics of recruitment in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller). *Plant Ecology*, 171(1-2), 123-137.
- Ne' eman, G., Goubitz, S., y Nathan, R. (2004) Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire - a critical review. *Plant Ecology*, 171(1-2), 69-79.
- Notivol, E., Cabanillas, A., González, R. y Revuelta, R. (2005) Caracterización de masas naturales de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill) en la depresión del Ebro. V Congreso Forestal Español, Zaragoza.
- Ortuño, F. y Ceballos, A. (1977) Los bosques españoles. INCAFO, Madrid.
- Ozenda, P. (1975) Sur les étages de végétation dans les montagnes du basin méditerranéen. Documents de cartographie ecologique, XVI, 1-32.
- Pausas, J.G., Ribeiro, F., y Vallejo, R. (2004) Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 203(1-3), 251-259.
- Pedrochi, C. (1998) Ecología de Los Monegros. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Centro de Desarrollo de Monegros.
- Peng, C., Zhang, L., Huang, S., Zhou X., Parton, J., Woods, M. (2001) Developing ecoregion-based height-diameter models for jack pine and black spruce in Ontario, Ministry of Natural Resources, Ontario For Res Inst, OFRI-Rep.159.
- Peña, D. (1995) Estadística. Modelos y métodos. Modelos lineales y series temporales. 2ª edición. Alianza Universidad, Madrid. 754 p.
- Peñuelas, J., I. Filella, F. Lloret, J. Piñol y D. Siscart. (2000) Effects of a severe drought on water and nitrogen use by *Quercus ilex* and *Phyllirea latifolia*. *Biologia Plantarum* 43: 47-53.
- Peñuelas, J., F. Lloret y R. Montoya. (2001) Severe drought effects on Mediterranean woody flora. *Forest Science* 47: 214-218.
- Pita, P.A. (1965) Crecimiento y producción de las masas forestales españolas (Resumen de la medición de parcelas en el año 1965). *Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*, 10, 35-59.

- Ramírez, J.I. (1995) Mapa Geológico de España, Hoja 322 Remolinos, escala 1:50.000. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Ramírez, J.I. (1998) Mapa Geológico de España, Hoja 356 Lanaja, escala 1:50.000. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Röhle, H. (1992) Ertragstafel für die Aleppokiefer (*Pinus halepensis*) in Israel. Lehrstuhl für Waldwachstum-kunde der Universität München, 65p.
- Riemer, T., Gadow, K.v. y Sloboda, V.B. (1995) Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. Allg. Forst-und J.- Ztg., 166 (7), 144-147.
- Rivas-Martínez, S. (1987) Memoria y mapas de series de vegetación de España. 1:400.000. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Ruíz de la Torre, J. (1990-1992) Mapa Forestal de España. ICONA. Madrid.
- San Miguel, A. (2003) Gestión silvopastoral y conservación de especies y espacios protegidos. Ponencia XLIII. Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos. Granada 2003.
- Schütz, J.P. (1990) Sylviculture 1: Principes d'éducation des fôrest. Presses Polytechniques et Universitaires. Lausanne. 243 pp.
- Serrada, R. (1995) Apuntes de selvicultura. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.
- Serrada, R. (1997) Apuntes de selvicultura I. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.
- Serrada, R. (2003) Regeneración natural. Situaciones, conceptos y evaluación. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 15, 11-16.
- Skordilis, A., y Thanos, C.A. (1997) Comparative Ecophysiology of Seed Germination Strategies in the Seven Pine Species Naturally Growing in Greece. In: Ellis, R.H., Black, M., Murdoch, A.J. y Hong, T.D. (eds.). Basic and Applied Aspects of Seed Biology, pp. 623-632.
- Sloboda, V.B., Gaffrey, D. y Matsumura, N. (1993) Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände. Allg. Forst. Jagdztg., 164, 225-228.
- Solá, J. y Soriano, C. (1998) Mapa Geológico de España, Hoja 385 Castejón de Monegros, escala 1:50.000. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Soriano, C., Alvaro, M., Ortega, I. y Hernández, A. (1998) Mapa Geológico de España, Hoja 323 Zuera, escala 1:50.000. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Souleres, G. (1975) Classes de fertilité et production de forêts tunisiennes de pin d'Alep. Revue Forestière Française. XXVII - (1).

- Thomas, F. M. y G. Hartmann. (1996) Soil and tree water relations in mature oak stands of northern Germany differing in the degree of decline. *Annals des Sciences forestières*, 53, 697-720.
- Trabaud, I. (1992) *Les feux de forêts: Mécanismes, comportement et environnement*. France-Selection. Aubervilliers.
- Tsitsoni, T. (1997) Conditions determining natural after wildfires in the *Pinus halepensis* (Miller, 1768) forests of Kassandra peninsula (north Greece). *Forest Ecology and Management*, 92(1-3), 199-208.
- Uribe, A. (1997) Modelización del crecimiento de *Pinus patula* Schlecth et Cham en la region Andina suroccidental colombiana. In: Ortega, A., Gezan, S. (eds.), *Proceedings of the IUFRO Conference on Modelling Growth of Fast-Grown Tree Species*. Valdivia (Chile). pp. 36-51.
- Valero, J. (2000) El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en Cataluña: estado de la especie en el territorio catalán, propuestas selvícolas en los planes técnicos de gestión y mejora forestal y usos industriales. *Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales*, 10, 97-102.
- Vega, J.A. (2003) Regeneración del género *Pinus* tras incendio. *Actas de la III Reunión sobre regeneración natural y IV reunión sobre ordenación de montes*. *Cuadernos de la S.E.C.F.*, 15, 59-68.
- Verkaik, I., y Espelta, J.M. (2006) Post-fire regeneration thinning, cone production, serotiny and regeneration age in *Pinus halepensis*. *Forest Ecology and Management*, 231(1-3), 155-166.

Capítulo 2.- RELACIÓN ALTURA-DIÁMETRO GENERALIZADA

2.1. Introducción

El diámetro normal es la variable de árbol que se mide más fácilmente y con menor coste en los inventarios forestales, pero no es suficiente por sí misma para tener un conocimiento adecuado de la estructura o del crecimiento de las masas forestales. Por ello, es necesaria la medición de otras variables de árbol, siendo la altura total una de las más importantes. El conocimiento de la altura total, junto con el diámetro normal, permite la construcción de ecuaciones para la estimación de existencias o su uso en modelos de crecimiento.

Sin embargo, la medición de la altura en todos los árboles de una parcela supone no sólo un aumento en el coste del inventario, sino que en ocasiones proporciona valores poco exactos por la dificultad de su medición (Gadow, 2001). Debido a estos condicionantes, habitualmente se mide en una submuestra de los árboles en los que se mide el diámetro normal, obteniendo la altura indirectamente en el resto de los pies mediante relaciones de altura-diámetro.

Estas relaciones se suelen ajustar independientemente para cada rodal regular o coetáneo de una determinada especie (Cañadas *et al.*, 1999) y se denominan relaciones altura-diámetro locales, debido a su reducido ámbito de aplicación. Las ecuaciones habitualmente empleadas en estas relaciones pueden ser lineales (Hohenadl, 1936; Naslund, 1937; Michailoff, 1943; Krenn, 1944), o más comúnmente modelos no lineales (Huang *et al.*, 1992).

Sin embargo, estas curvas de carácter local no se adaptan bien a todas las posibles situaciones que pueden encontrarse en una masa, debido a las siguientes razones (Prodan *et al.*, 1997; López Sánchez *et al.*, 2003; Barrio *et al.*, 2004):

- (1) La curva de alturas de rodales jóvenes, en general, tiene pendientes más fuertes, mientras que a medida que aumenta la edad, o se reduce la calidad, la curva se aplanan.

- (2) La curva de alturas se desplaza con la edad, variando para cada clase sociológica.
- (3) Los árboles que crecen en masas de elevada densidad tienen un diámetro menor, para la misma altura, que otros que crecen en masas menos densas, como consecuencia de la mayor competencia entre individuos.

Con objeto de solventar estos problemas y reducir los errores en la estimación de las alturas en las masas de *Pinus halepensis* estudiadas, se han desarrollado relaciones altura-diámetro generalizadas. En estas relaciones, además del diámetro normal y la altura total, se incluyen diferentes variables de masa que recogen la variabilidad existente en cuanto a edad, densidad o calidad de estación en los distintos rodales en los que se han instalado parcelas de inventario. De esta forma, al incluir en las ecuaciones variables de estado de la masa, se consigue modelizar la evolución en el tiempo de la relación entre la altura y el diámetro (Gadow, 2001).

2.2. Material y métodos

2.2.1. Datos empleados

Tal y como se ha explicado en el capítulo 1 de esta tesis, se han empleado tanto los datos de árbol como de parcela procedentes del inventario realizado en las masas objeto de este estudio durante los meses de octubre de 2001 a junio de 2002, por el Servicio Provincial de Medio Ambiente de Zaragoza. Los datos de árbol individual corresponden a la altura total y al diámetro normal, y las variables dasométricas de parcela utilizadas han sido las siguientes: área basimétrica, diámetro medio cuadrático, diámetro máximo, diámetro dominante, altura dominante, altura media, edad y densidad (expresada como número de pies/ha).

Sin embargo, la altura dominante no fue una variable a medir en el inventario del que se han obtenido los datos para los análisis de esta tesis, por lo que fue necesaria su estimación posterior en una parte de los árboles, resultando que del total de árboles dominantes existentes en el inventario, 3.537, se contaba con datos reales de altura total para 1.887, el 53% de ellos, ya que coincidían con árboles tipo medidos, de los cuales 795 correspondieron a Alcubierre (el 44 % de los que le corresponden) y 1.092 a Zuera (el 63%).

Por este motivo fue necesaria la estimación de la altura de un 47% de los árboles dominantes (1.650 pies). Para ello, en un primer intento se probó el ajuste de los 5.287 pares de datos de diámetros normales y alturas totales con aproximadamente 3.000 funciones (con el programa TableCurves 2DTM, 1989-1994), tanto lineales como no lineales, pero dependientes de un sola variable, para cada uno de los montes y para el total de los datos. El tipo de funciones ajustadas se presentan en la Tabla 2.1 y fueron las siguientes:

Tabla 2.1. Funciones ajustadas para la estimación de la altura dominante en los árboles en los que no se había medido dicha variable

TIPO DE FUNCIÓN	Nº funciones
Lineal estándar de un término en x con intercepto $y = f_1$	21
Lineal estándar de Y-transformada de un término en x con intercepto $f(y) = f_1$	83
Lineal estándar de dos términos en x con intercepto $y = f_1 + f_2$	210
Lineal estándar de Y-transformada de dos términos en x con intercepto $f(y) = f_1 + f_2$	419
Lineal estándar de tres términos en x con intercepto $y = f_1 + f_2 + f_3$	1.330
Lineal estándar de cuatro términos en x con intercepto $y = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$	1.140
Lineal polinomial estándar	7
Lineal polinomial de Y-transformada	14
Lineal polinomial equilibrada	6
Lineal polinomial de logaritmo natural	8
Lineal polinomial equilibrada de log(x)	7
Lineal polinomial inversa	3
Lineal polinomial inversa de log(x)	4
Lineal racional estándar	9
Lineal racional de Y-transformada	12
Lineal racional de log(x)	9
Lineal racional de raíz cuadrada simple	9
No lineales	136

Las funciones que arrojaron el mejor ajuste, para cada una de las zonas de forma independiente y para el conjunto total de los datos, fueron las siguientes (Tabla 2.2):

Tabla 2.2. Funciones que presentaron mejor ajuste para la estimación de la altura dominante en los árboles en los que no se había medido dicha variable

ZONA	FUNCIÓN	R^2_{Adj}
TOTAL	$y = a + b \cdot x + c \cdot x^3 + d \cdot e^x + f \cdot e^{-x}$	0,460
ALCUBIERRE	$y = a + b \cdot x + c \cdot \ln x / x + d / x + f \cdot e^{-x}$	0,478
ZUERA	$y = a + b \cdot x + c \cdot x^3 + d / x^2 + f \cdot e^{-x}$	0,442

siendo y la altura total (en metros), x el diámetro normal (en centímetros) y a, b, c, d y f los parámetros.

El valor de los parámetros y su error estándar se incluye en la Tabla 2.3 y son los siguientes:

Tabla 2.3. Valores de los parámetros y errores estándar de las funciones ajustadas de la Tabla 2.2.

	TOTAL		ALCUBIERRE		ZUERA	
	Valor	Error estándar	Valor	Error estándar	Valor	Error estándar
<i>a</i>	3,0214	0,1146	* 3,0793	2,7889	3,5234	0,3519
<i>b</i>	0,2269	0,0077	0,0646	0,0114	0,0625	0,0059
<i>c</i>	-1,9825E-05	4,02E-06	* 35,4116	77,0260	-6,7927E-07	2,51E-07
<i>d</i>	3,8766E-29	1,28E-29	* -109,4026	190,0458	-441,5426	172,8017
<i>f</i>	-863,0250	299,4276	* -9477558649	1,02E+10	* 311330035,2	7,55E+08

*Parámetros no significativos a un nivel del 5%

Se resalta, por otra parte, que las R^2_{Adj} de estas funciones están muy próximas a las obtenidas con la ecuación lineal $y = a + b \cdot x$, resultando los valores que se presentan en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Valor de R^2_{Adj} en el ajuste de la ecuación lineal.

ZONA	R^2_{Adj}
TOTAL	0,455
ALCUBIERRE	0,476
ZUERA	0,433

Dados los R^2_{Adj} tan bajos obtenidos y la falta de significación de algunos parámetros, especialmente en el caso de Alcubierre, se creyó necesario estimar las alturas mediante otra fórmula. Así, se consideró la posibilidad de obtener el mejor modelo de altura-diámetro generalizada que no utilizara la H_0 como variable y aplicarlo en este caso para obtener las alturas dominantes no medidas, siempre que el ajuste mejorara. Se realizaron, entonces, los ajustes tal y como se explica posteriormente en este mismo Capítulo, resultando como la función más apropiada para las dos zonas de estudio la de Sloboda *et al.* (1993) Mod., cuya expresión corresponde a la ecuación (ec.2.1) que se muestra a continuación. Los valores de sus estadísticos de comparación y de los parámetros son los correspondientes al modelo de referencia AD11 que aparece en las Tablas 2.9 y 2.10. Se aplicó a cada monte la fórmula con los parámetros de su ajuste que le correspondían por zona, y con ella se obtuvo la altura de los 1.650 pies dominantes a los que no se les había medido la altura en campo.

Sloboda *et al.* (1993) Mod.
$$h = 1,3 + (H_m - 1,3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d_g}{d}\right)} \cdot e^{b_1 \cdot \left(\frac{d}{d_g} - 1\right)} \quad (\text{ec.2.1})$$

Por otra parte, los resultados de los ajustes anteriores justifican la elaboración de una relación altura-diámetro generalizada, ya que la utilización de una relación altura-diámetro global, que emplee únicamente el diámetro normal como variable independiente, proporciona unos resultados muy pobres (valores de R^2_{Adj} algo superiores a 0,4 para árboles dominantes).

Una vez finalizado el proceso descrito, y obtenida la altura dominante para el total de las parcelas, se pudo proceder al ajuste de los diferentes modelos. Para ello, se utilizaron 5.287 pares de datos diámetro normal-altura total. Dichos datos fueron medidos en las 924 parcelas del inventario anteriormente mencionado, procediendo 2.168 árboles y 485 parcelas de los montes de la zona de Alcubierre y 3.119 árboles y 439 parcelas de los de la zona de Zuera. Estos árboles se corresponden con los árboles tipo seleccionados en el inventario, cuyo número y sistema de selección se ha explicado en el capítulo 1 "Introducción".

En las Tablas 2.5, 2.6 y 2.7 se muestran los estadísticos descriptivos de las variables empleadas en el ajuste de los modelos altura-diámetro, tanto para el conjunto de los datos como para cada una de las dos zonas estudiadas por separado. Dichas variables han sido: h (altura total, en m), d (diámetro normal, en cm), d_g (diámetro medio cuadrático, en cm), H_m (altura media de la masa, en m), H_0 (altura dominante, en m), G (área basimétrica, en m²/ha), D_0 (diámetro dominante, en cm), D_{max} (diámetro normal máximo, en cm), N (número de pies por hectárea) y t (edad, en años).

Tabla 2.5. Valores de los estadísticos descriptivos de los datos globales empleados en el ajuste.

Estadísticos	h	d	d_g	H_m	H_0	G	D_0	D_{max}	N	t
Mínimo	1,50	6,37	7,60	2,50	2,50	0,09	7,64	7,32	18,83	25,00
Máximo	18,00	67,16	40,70	14,80	15,16	43,69	44,25	67,16	2.800,00	124,00
Media	6,88	17,93	18,07	6,82	7,48	10,85	23,22	25,44	482,84	58,09
Desviación estándar	2,28	7,7	5,35	2,04	2,28	7,99	8,97	8,67	445,01	15,35
Coef. de variación (%)	33	43	30	30	31	74	29	34	92	26

Tabla 2.6. Valores de los estadísticos descriptivos de los datos de Alcubierre empleados en el ajuste.

Estadísticos	h	d	d_g	H_m	H_0	G	D_0	D_{max}	N	t
Mínimo	1,80	7,64	7,60	2,50	2,50	0,09	7,64	7,64	18,83	25,00
Máximo	18,00	67,16	40,70	14,80	15,16	43,69	42,84	67,16	2.800,00	124,00
Media	7,38	18,69	18,61	7,24	7,90	11,84	23,95	25,47	519,14	58,46
Desviación estándar	2,49	8,12	5,49	2,18	2,43	8,54	6,76	8,68	491,15	15,74
Coef. de variación (%)	34	43	29	30	31	72	28	34	95	27

Tabla 2.7. Valores de los estadísticos descriptivos de los datos de Zuera empleados en el ajuste.

Estadísticos	h	d	d_g	H_m	H_0	G	D_0	D_{max}	N	t
Mínimo	1,50	6,37	7,60	3,00	3,00	0,09	7,64	7,32	18,83	25,00
Máximo	16,70	62,39	40,40	12,70	13,28	33,26	62,39	62,39	2.600,00	112,30
Media	6,53	17,41	17,46	6,36	7,02	9,75	22,41	25,41	442,74	57,69
Desviación estándar	2,06	7,36	5,13	1,77	2,01	7,17	6,72	8,66	384,31	14,91
Coef. de variación (%)	31	42	29	28	29	74	30	34	87	26

En las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se muestra la dispersión de los datos utilizados para la relación altura-diámetro, tanto para el conjunto total de los datos como para las zonas de Alcubierre y Zuera por separado. Como puede observarse, solamente un dato alcanza los 18 metros de altura, encontrándose la mayor parte de los datos por debajo de los 16 metros en Alcubierre y de 14 metros en Zuera. Además, se aprecia una gran variabilidad, con un amplio rango en altura para un mismo diámetro, lo que confirma la necesidad de ajustar una relación altura-diámetro generalizada.

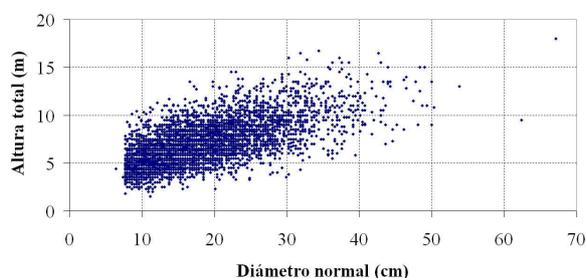


Figura 2.1. Gráfico de dispersión del conjunto total de pares de datos diámetro normal-altura total empleados.

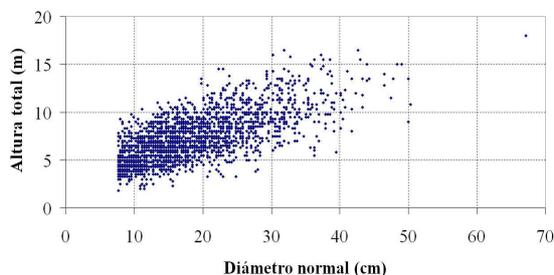


Figura 2.2. Gráfico de dispersión de los pares de datos diámetro normal-altura total empleados en los ajustes correspondientes a la zona de Alcubierre.

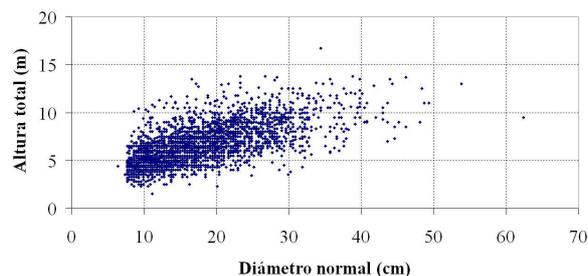


Figura 2.3. Gráfico de dispersión de los pares de datos diámetro normal-altura total correspondientes a la zona de Zuera.

2.2.2. Modelos analizados

Se han empleado numerosas ecuaciones para modelizar la relación altura-diámetro a partir de variables tanto de árbol como de masa. Algunas de las ecuaciones altura-diámetro generalizadas derivan de ecuaciones altura-diámetro locales, tal y como explican López Sánchez *et al.* (2003), quienes recopilan 26 modelos de ecuaciones altura-diámetro generalizadas desarrolladas específicamente para una determinada especie o para una zona concreta de forma empírica. A pesar de no poseer muchas de las características deseables, la mayoría de tales funciones han proporcionado buenos resultados en la estimación de alturas en determinadas circunstancias, y han sido analizadas por los autores anteriores para la especie *Pinus radiata* en Galicia, agrupándolas en las siguientes tres categorías (López Sánchez *et al.*, 2003):

- **Grupo 1:** Modelos que precisan bajo esfuerzo de muestreo. Incluye aquellos modelos que necesitan únicamente mediciones diamétricas y de la edad en algunos casos.
- **Grupo 2:** Modelos que demandan un esfuerzo de muestreo medio, incluyéndose en este grupo aquéllos que precisan de mediciones de diámetro y de una muestra de alturas de árboles de la masa.
- **Grupo 3:** Modelos que requieren un elevado esfuerzo de muestreo, en los que además de las variables anteriores es preciso conocer la edad de la masa.

En la presente tesis se han empleado 30 modelos, cuya expresión se relaciona en la Tabla 2.8., junto con su autor, las variables del modelo, el grupo al que pertenecen según la clasificación anterior y una referencia de identificación.

Tabla 2.8. Modelos altura-diámetro generalizados analizados.

Ref.	Modelo	Expresión	Grupo y variables
AD1	CURTIS (1967)	$h = 10 \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{d} + b_2 \cdot \frac{1}{t} + b_3 \cdot \frac{1}{d_g \cdot t} \right)$	1 d, d_g, t
AD2	COX I (1994)	$h = e^{(b_0 + b_1 \cdot \ln d_g + b_2 \cdot \ln N + b_3 \cdot \sqrt{d})}$	1 d, d_g, N
AD3	CLUTTER y ALLISON (1974)	$h = 1,3 + 10 \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{d} + b_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + b_3 \cdot \frac{1}{d \cdot \sqrt{t}} + b_4 \cdot \frac{\log N}{\sqrt{t}} \right)$	1 d, t, N
AD4	MØNNES (1982)	$h = 1,3 + \left[b_0 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1,3} \right)^{1/3} \right]^{-3}$	2 d, D_0, H_0
AD5	CAÑADAS <i>et al.</i> I (1999)	$h = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot \left(\frac{d}{D_0} \right)^{b_0}$	2 d, D_0, H_0
AD6	CAÑADAS <i>et al.</i> II (1999)	$h = 1,3 + \frac{d}{\frac{D_0}{H_0 - 1,3} + b_0 \cdot (D_0 - d)}$	2 d, D_0, H_0
AD7	CAÑADAS <i>et al.</i> III (1999)	$h = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot \frac{1 - e^{b_0 \cdot d}}{1 - e^{b_0 \cdot D_0}}$	2 d, D_0, H_0
AD8	CAÑADAS <i>et al.</i> IV (1999)	$h = 1,3 + \left[b_0 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1,3} \right)^{1/2} \right]^{-2}$	2 d, D_0, H_0
AD9	GAFFREY (1988)	$h = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d_g}{d} \right) + b_1 \cdot \left(\frac{1}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	2 d, d_g, H_0
AD10	SLOBODA <i>et al.</i> (1993)	$h = 1,3 + (H_m - 1,3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g} \right)} \cdot e^{b_1 \cdot \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	2 d, d_g, H_m
AD11	SLOBODA <i>et al.</i> (1993) Mod.	$h = 1,3 + (H_m - 1,3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d_g}{d} \right)} \cdot e^{b_1 \cdot \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	2 d, d_g, H_m
AD12	HARRISON <i>et al.</i> (1986)	$h = H_0 \cdot \left(1 + b_0 \cdot e^{b_1 \cdot H_0} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_2 \cdot d}{H_0}} \right)$	2 d, H_0
AD13	PIENAAR (1991) Mod.*	$h = b_0 \cdot H_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_1 \cdot d}{d_g}} \right)^{b_2}$	2 d, d_g, H_0
AD14	HUI y GADOW (1993)	$h = 1,3 + b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot d^{b_2 \cdot H_0^{b_3}}$	2 d, H_0
AD15	MIRKOVICH (1958)	$h = 1,3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g) \cdot e^{-b_3/d}$	2 d, d_g, H_0
AD16	SCHRÖDER y ÁLVAREZ I	$h = 1,3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g) \cdot e^{-b_3/\sqrt{d}}$	2 d, d_g, H_0

Ref.	Modelo	Expresión	Grupo y variables
	(2001)		
AD17	COX III (1994) Mod. **	$h = H_m \cdot \left[\begin{aligned} &b_0 + b_1 \cdot H_m + b_2 \cdot \frac{H_m}{d_g} + b_3 \cdot d + \\ &+ b_4 \cdot \frac{N}{d_g \cdot (H_m \cdot d_g)} \end{aligned} \right]$	2 d, d_g, H_m, N
AD18	SCHRÖDER y ÁLVAREZ (2001) II	$h = 1,3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g + b_3 \cdot G) \cdot e^{-b_4/\sqrt{d}}$	2 d, G, d_g, H_0
AD19	COX II (1994) Mod. 1 **	$h = b_0 + b_1 \cdot H_m + b_2 \cdot d_g^{0,95} + b_3 \cdot e^{-0,08 \cdot d} + b_4 \cdot H_m^3 \cdot e^{-0,08 \cdot d} + b_5 \cdot d_g^3 \cdot e^{-0,08 \cdot d}$	2 d, d_g, H_m
AD20	COX II (1994) Mod. 2 **	$h = b_0 + b_1 \cdot H_m + b_2 \cdot d_g + b_3 \cdot e^{b_4 \cdot d} + b_5 \cdot H_m^{b_6} \cdot e^{b_2 \cdot d} + b_7 \cdot d_g^{b_8} \cdot e^{b_4 \cdot d}$	2 d, d_g, H_m
AD21	SOARES y TOMÉ I (2002) y	$h = H_0 \cdot \left[1 + \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{N}{1000} + b_2 \cdot D_{\max} \right) \cdot e^{b_3 \cdot H_0} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_4 \cdot d}{H_0}} \right)$	2 d, D_{\max}, H_0, N
AD22	SOARES y TOMÉ III (2002) y	$h = H_0 \cdot \left[1 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 + b_2 \cdot d_g) \cdot e^{b_3 \cdot H_0} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_4 \cdot d}{H_0}} \right)$	2 d, d_g, H_0
AD23	SOARES y TOMÉ II (2002) y	$h = H_0 \cdot \left[1 + \left(b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot \frac{N}{1000} + b_3 \cdot D_0 \right) \cdot e^{b_4 \cdot H_0} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_5 \cdot d}{H_0}} \right)$	3 d, D_0, H_0, t, N
AD24	SOARES y TOMÉ IV (2002) y	$h = H_0 \cdot \left(1 + (b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot H_0 + b_3 \cdot d_g) \cdot e^{b_4 \cdot H_0} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{b_5 \cdot d}{H_0}} \right)$	3 d, d_g, H_0, t
AD25	TOMÉ I (1989)	$h = H_0 \cdot e^{\left(b_0 + b_1 \cdot H_0 + b_2 \cdot \frac{N}{1000} + b_3 \cdot t \right) \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right)}$	3 d, D_0, H_0, t, N
AD26	TOMÉ II (1988)	$h = H_0 \cdot e^{(b_0 + b_1 \cdot H_0 + b_2 \cdot d_g + b_3 \cdot t) \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right)}$	3 d, d_g, D_0, H_0, t
AD27	LENHART (1968)	$h = \frac{H_0}{e^{b_0 + \left[\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_{\max}} \right) \cdot (b_1 + b_2 \cdot \ln N + b_3 \cdot \frac{1}{t} + b_4 \cdot \ln H_0) \right]}}$	3 d, H_0, t, N, D_{\max}
AD28	AMATEIS <i>et al.</i> (1995)	$h = b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot 10^{\left[\frac{b_2}{t} + \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_{\max}} \right) \cdot (b_3 + b_4 \cdot \frac{\log N}{t}) \right]}$	3 d, H_0, t, N, D_{\max}
AD29	BURKHART y STRUB (1974) y	$h = e^{b_0 + b_1 \cdot \ln H_0 + b_2 \cdot \frac{1}{t} + b_3 \cdot \frac{\ln N}{d} + b_4 \cdot \frac{1}{d \cdot t} + b_5 \cdot \frac{1}{d}}$	3 d, H_0, t, N
AD30	PÁSCOA (1987)	$h = b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot G^{b_2} \cdot N^{b_3} \cdot e^{\frac{b_4}{t} + \frac{b_5}{d}}$	3 d, H_0, t, G

* La estimación de un parámetro que acompaña al número e en el modelo original era muy cercana a uno, aunque presentaba un error asintótico elevado, por lo que se modificó el modelo prescindiendo de dicho parámetro.

** Se ha tomado como variable independiente la altura media aritmética de la masa H_m , lo que supone una modificación del modelo original, que utiliza el valor medio de la altura del árbol más alto y más bajo de la masa (López Sánchez *et al.*, 2003).

donde:

h : altura total (m).

d : diámetro normal (cm).

d_g : diámetro medio cuadrático (cm).

D_0 : diámetro dominante (cm).

D_{\max} : diámetro normal máximo (cm).

H_m : altura media de la masa (m).

H_0 : altura dominante de la masa (m).

N : número de pies por hectárea.

G : area basimétrica (m^2/ha).

t : edad (años).

b_0, \dots, b_n : parámetros a estimar por regresión.

e : es el número e .

\ln : logaritmo neperiano

\log : logaritmo en base 10.

2.2.3. Metodología

2.2.3.1. Análisis estadísticos de los ajustes, selección de los modelos y evaluación gráfica

Dado que la mayor parte de los modelos ensayados no son lineales en los parámetros, la estimación de los mismos se ha realizado por regresión no lineal empleando el procedimiento iterativo Gauss-Newton (Hartley, 1961). Como valores inicializadores de los parámetros en la iteración se han empleado los obtenidos por López Sánchez *et al.* (2003) para *Pinus radiata* en Galicia.

Para poder realizar la comparación entre los diferentes modelos se han calculado para cada uno de ellos los siguientes estadísticos: la raíz del error medio cuadrático (REMC),

que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), que refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo y que tiene en cuenta el número total de parámetros a estimar. Un modelo será mejor que otro si se obtienen menores valores de $REMC$ y mayor de R^2_{Adj} . También se ha calculado el criterio de información de Akaike (AIC), de tal forma que un modelo será mejor que otro si obtiene un menor valor de este índice. Finalmente se ha obtenido el valor del índice de condición máximo (IC), con el que se ha analizado la existencia de multicolinealidad. Las expresiones matemáticas de estos estadísticos se han incluido en el Capítulo 1 "Introducción".

Además se ha realizado una evaluación gráfica mediante la representación de los valores observados frente a los valores predichos por el modelo, y de los residuos frente a los valores de diferentes variables de masa.

2.2.3.2. Comparación entre zonas

Todos los análisis se han realizado tanto para el total de los datos combinados como para el conjunto de datos de cada zona por separado (Alcubierre y Zuera). Para comprobar si existen diferencias entre las dos zonas estudiadas se ha usado el test F (Bates y Watts, 1988) y el incremento en $REMC$ (Δ_{REMC} en %) (Corral-Rivas *et al.*, 2007), tal y como se ha explicado en el capítulo 1 de Introducción.

2.3.- Resultados y discusión

2.3.1. Selección de los modelos

En la Tabla 2.9 se muestran los estadísticos utilizados para la comparación de los diferentes modelos, tanto para el conjunto total de los datos como para los datos correspondientes a cada una de las zonas de Alcubierre y Zuera por separado.

Tabla 2.9. Valores de los estadísticos de comparación de los diferentes modelos para el total de los datos y cada una de las zonas por separado.

Ref.	Variables	TOTAL			ALCUBIERRE			ZUERA		
		REMC	R^2_{Adj}	AIC	REMC	R^2_{Adj}	AIC	REMC	R^2_{Adj}	AIC
AD1	d, d_g, t	1,667	0,468	5.408,92	1,793	0,492	2.538,15	1,520	0,457	2.616,36
AD2	d, d_g, N	1,544	0,542	4.600,33	1,630	0,580	2.125,17	1,630	0,580	2.125,17
AD3	d, t, N	1,698	0,448	5.607,53	1,817	0,478	2.597,31	1,517	0,478	2.597,31
AD4	d, D_0, H_0	1,029	0,797	304,13	0,995	0,844	-20,08	1,051	0,740	314,85
AD5	d, D_0, H_0	1,022	0,800	228,51	0,977	0,849	-99,80	1,051	0,740	315,62
AD6	d, D_0, H_0	1,096	0,770	976,63	1,086	0,814	360,40	1,098	0,716	585,54
AD7	d, D_0, H_0	1,035	0,795	370,80	1,009	0,839	40,12	1,054	0,739	329,68
AD8	d, D_0, H_0	1,028	0,798	297,78	0,992	0,845	-33,94	1,052	0,740	319,04
AD9	d, d_g, H_0	1,220	0,715	2.105,55	1,202	0,772	801,12	1,231	0,643	1.300,11
AD10	d, d_g, H_m	1,000	0,804	8,20	1,024	0,834	108,58	0,983	0,773	-103,36
AD11	d, d_g, H_m	0,966	0,821	-361,22	0,982	0,848	-73,76	0,954	0,786	-292,35
AD12	d, H_0	1,064	0,783	656,90	1,073	0,818	310,31	1,050	0,741	307,56
AD13	d, d_g, H_0	1,056	0,787	583,19	1,043	0,828	190,16	1,063	0,734	390,02
AD14	d, H_0	1,057	0,786	592,08	1,051	0,825	220,91	1,056	0,737	347,28
AD15	d, d_g, H_0	1,040	0,793	421,75	1,042	0,828	183,46	1,034	0,748	213,78
AD16	d, d_g, H_0	1,029	0,797	310,31	1,026	0,833	119,33	1,026	0,752	168,48
AD17	d, d_g, H_m, N	0,972	0,819	-290,50	0,989	0,845	-40,34	0,960	0,782	-250,03
AD18	d, G, d_g, H_0	1,028	0,798	294,88	1,021	0,835	96,12	1,026	0,752	169,20
AD19	d, d_g, H_m	0,961	0,823	-417,96	0,980	0,848	-78,56	0,945	0,789	-343,74
AD20	d, d_g, H_m	0,942	0,830	-618,69	0,963	0,853	-152,78	0,926	0,797	-469,17
AD21	d, D_{max}, H_0, N	1,044	0,791	457,94	1,051	0,826	221,53	1,033	0,749	207,14
AD22	d, d_g, H_0	1,043	0,792	453,02	1,052	0,825	225,90	1,031	0,750	195,04
AD23	d, D_0, H_0, t, N	1,028	0,798	300,72	1,013	0,838	62,29	1,028	0,751	179,75
AD24	d, d_g, H_0, t	1,032	0,796	344,75	1,025	0,834	117,04	1,029	0,751	183,42
AD25	d, D_0, H_0, t, N	1,014	0,803	150,06	0,976	0,849	-99,11	1,038	0,746	238,39
AD26	d, d_g, D_0, H_0, t	1,022	0,800	240,76	0,982	0,848	-72,01	1,048	0,741	300,49
AD27	d, H_0, t, N, D_{max}	1,056	0,786	587,83	1,032	0,832	142,68	1,070	0,730	430,41
AD28	d, H_0, t, N, D_{max}	1,050	0,789	520,77	1,028	0,833	128,08	1,053	0,739	329,11
AD29	d, H_0, t, N	1,032	0,796	340,68	1,011	0,839	54,40	1,039	0,746	249,46
AD30	d, H_0, t, G	1,034	0,795	357,70	1,012	0,838	58,97	1,040	0,746	250,12

En la Tabla 2.10 se muestran los valores de los parámetros de los modelos ajustados, así como sus errores estándar, los valores de probabilidad y el índice de condición, tanto para el conjunto total de los datos como para los datos correspondientes a cada una de las zonas de Alcobierre y Zuera por separado.

Tabla 2.10. Valores de las estimaciones de los parámetros, errores estándar, niveles de significación y número de condición de los modelos ajustados, para el total de los datos y cada una de las zonas por separado.

Ref.	P.	TOTAL				ALCUBIERRE				ZUERA			
		Estim.	Error estándar.	Pr>t	N° Cond.	Estim.	Error estándar.	Pr>t	N° Cond.	Estim.	Error estándar.	Pr>t	N° Cond.
AD1	b₀	1,0249	0,0075	<0,0001	19,7	1,0335	0,0107	<0,0001	17,5	1,0430	0,0105	<0,0001	22,8
	b₁	-3,1655	0,0735	<0,0001		-3,3186	0,1184	<0,0001		-3,0029	0,0902	<0,0001	
	b₂	8,2365	0,6335	<0,0001		9,4041	0,8607	<0,0001		3,7436	0,9327	<0,0001	
	b₃	-126,4000	6,8788	<0,0001		-127,1000	10,3176	<0,0001		-92,3977	9,2149	<0,0001	
AD2	b₀	-0,8271	0,0591	<0,0001	50,7	-0,9099	0,0934	<0,0001	52,5	-0,6098	0,0748	<0,0001	49,8
	b₁	0,4819	0,0167	<0,0001		0,5118	0,0260	<0,0001		0,4153	0,0213	<0,0001	
	b₂	0,1020	0,0044	<0,0001		0,1070	0,0065	<0,0001		0,0943	0,0058	<0,0001	
	b₃	0,1792	0,0040	<0,0001		0,1798	0,0061	<0,0001		0,1773	0,0052	<0,0001	
AD3	b₀	1,1635	0,0396	<0,0001	97,6	1,1703	0,0552	<0,0001	89,4	1,2006	0,0534	<0,0001	104,8
	b₁	-6,7555	0,7058	<0,0001		-9,2479	1,0429	<0,0001		-5,1104	0,8973	<0,0001	
	b₂	-1,6735	0,3153	<0,0001		-1,5226	0,4370	0,0005		-2,5141	0,4328	<0,0001	
	b₃	12,9313	5,1984	0,1340		27,4645	7,5189	0,0030		4,9601	6,7058	0,4577	
	b₄	0,1469	0,0165	<0,0001		0,1874	0,0240	<0,0001		0,1692	0,0224	<0,0001	
AD4	b₀	1,3956	0,0202	<0,0001	1,0	1,3425	0,0285	<0,0001	1,0	1,4395	0,0283	<0,0001	1,0
AD5	b₀	0,4372	0,0058	<0,0001	1,0	0,4265	0,0081	<0,0001	1,0	0,4461	0,0081	<0,0001	1,0
AD6	b₀	-0,0742	0,0007	<0,0001	1,0	-0,0705	0,0010	<0,0001	1,0	-0,0787	0,0010	<0,0001	1,0
AD7	b₀	-0,0767	0,0012	<0,0001	1,0	-0,0772	0,0017	<0,0001	1,0	-0,0764	0,0017	<0,0001	1,0
AD8	b₀	1,5564	0,0230	<0,0001	1,0	1,4858	0,0321	<0,0001	1,0	1,6164	0,0326	<0,0001	1,0
AD9	b₀	0,3065	0,0338	<0,0001	9,0	0,3355	0,0467	<0,0001	8,7	0,2956	0,0491	<0,0001	9,4
	b₁	1,7887	0,6430	0,0056		0,7962	0,9140	0,3661		2,3344	0,9130	0,0111	
AD10	b₀	-0,3973	0,0075	<0,0001	2,0	-0,3910	0,0112	<0,0001	2,0	-0,4032	0,0102	<0,0001	2,0
	b₁	-0,0131	0,0026	<0,0001		-0,0159	0,0038	<0,0001		-0,0103	0,0035	0,0035	
AD11	b₀	0,3532	0,0068	<0,0001	1,3	0,3421	0,0099	<0,0001	1,3	0,3640	0,0093	<0,0001	1,3
	b₁	0,0315	0,0021	<0,0001		0,0275	0,0031	<0,0001		0,0356	0,0029	<0,0001	
AD12	b₀	0,0419	0,0055	<0,0001	10,8	0,0449	0,0091	<0,0001	10,7	0,0467	0,0081	<0,0001	10,9
	b₁	0,0770	0,0109	<0,0001		0,0571	0,0167	0,0007		0,0755	0,0160	<0,0001	
	b₂	0,8818	0,0131	<0,0001		0,9452	0,0208	<0,0001		0,8334	0,0168	<0,0001	
AD13	b₀	1,2421	0,0332	<0,0001	48,0	1,3008	0,0685	<0,0001	61,6	1,2067	0,0364	<0,0001	41,0
	b₁	0,9238	0,1182	<0,0001		0,7308	0,1755	<0,0001		1,0742	0,1600	<0,0001	
	b₂	0,6028	0,0395	<0,0001		0,5267	0,0504	<0,0001		0,6711	0,0603	<0,0001	
AD14	b₀	0,2086	0,0332	<0,0001	260,8	0,1971	-0,1746	<0,0001	284,0	0,2498	0,0537	<0,0001	253,0
	b₁	1,0501	0,0742	<0,0001		1,1056	0,1123	<0,0001		0,9382	0,1025	<0,0001	
	b₂	0,5174	0,0742	<0,0001		0,5528	0,1173	<0,0001		0,4566	0,0810	<0,0001	

	b₃	-0,1242	0,0742	0,0464		-0,1746	0,0964	0,0709		-0,0478	0,0837	0,5628	
AD15	b₀	1,5837	0,1224	<0,0001	16,0	1,4809	0,1814	<0,0001	15,74	1,8500	0,1704	<0,0001	16,15
	b₁	1,1588	0,0150	<0,0001		1,1508	0,0208	<0,0001		1,1413	0,0219	<0,0001	
	b₂	0,0875	0,0069	<0,0001		0,0819	0,0099	<0,0001		0,0922	0,0096	<0,0001	
	b₃	7,5521	0,1293	<0,0001		7,1802	0,1896	<0,0001		7,8414	0,1758	<0,0001	
AD16	b₀	2,9345	0,2101	<0,0001	21,9	2,7693	0,3033	<0,0001	21,7	3,3423	0,2991	<0,0001	22,0
	b₁	1,8258	0,0317	<0,0001		1,7684	0,0433	<0,0001		1,8409	0,0463	<0,0001	
	b₂	0,1599	0,0116	<0,0001		0,1485	0,0161	<0,0001		0,1698	0,0165	<0,0001	
	b₃	3,7920	0,0622	<0,0001		3,6084	0,0904	<0,0001		3,9414	0,0854	<0,0001	
AD17	b₀	0,7249	0,0106	<0,0001	20,4	0,7458	0,0157	<0,0001	20,2	0,6996	0,0151	<0,0001	20,8
	b₁	-0,0465	0,0015	<0,0001		-0,0447	0,0021	<0,0001		-0,0485	0,0023	<0,0001	
	b₂	0,7107	0,0329	<0,0001		0,6589	0,0465	<0,0001		0,7783	0,0474	<0,0001	
	b₃	0,0178	0,0003	<0,0001		0,0172	0,0004	<0,0001		0,0186	0,0004	<0,0001	
	b₄	-0,0006	0,0005	0,1721		-0,0008	0,0007	0,2632		-0,0005	0,0006	0,3969	
AD18	b₀	3,0496	0,2127	<0,0001	25,0	3,069	0,3114	<0,0001	25,3	3,3644	0,3001	<0,0001	24,9
	b₁	1,8779	0,0343	<0,0001		1,8534	0,0471	<0,0001		1,8621	0,0498	<0,0001	
	b₂	0,1708	0,0119	<0,0001		0,1732	0,0170	<0,0001		0,1727	0,0167	<0,0001	
	b₃	-0,0228	0,0055	<0,0001		-0,0370	0,0074	<0,0001		-0,0092	0,0081	0,2582	
	b₄	3,8039	0,0621	<0,0001		3,6212	0,0897	<0,0001		3,9478	0,0854	<0,0001	
AD19	b₀	2,5847	0,1481	<0,0001	34,5	2,0954	0,2281	<0,0001	34,1	3,0650	0,2033	<0,0001	35,1
	b₁	1,0448	0,0197	<0,0001		1,0699	0,0280	<0,0001		1,0006	0,0292	<0,0001	
	b₂	-0,0619	0,0095	<0,0001		-0,0453	0,0144	0,0017		-0,0724	0,0127	<0,0001	
	b₃	-4,9435	0,1959	<0,0001		-4,2104	0,3165	<0,0001		-5,5576	0,2553	<0,0001	
	b₄	-0,0029	0,0004	<0,0001		-0,0035	0,0006	<0,0001		-0,0018	0,0007	0,0075	
	b₅	-0,0002	0,0000	<0,0001		-0,0002	0,0000	<0,0001		-0,0002	0,0000	<0,0001	
AD20	b₀	4,5435	0,4675	<0,0001	392,2	3,7385	0,6494	<0,0001	273,0	4,9311	0,6317	<0,0001	495,0
	b₁	1,0245	0,0394	<0,0001		1,1062	0,0599	<0,0001		0,9537	0,0572	<0,0001	
	b₂	-0,0218	0,0163	0,1669		-0,0034	0,0261	0,8961		-0,0339	0,0208	0,0801	
	b₃	-4,4433	0,6439	<0,0001		-4,4463	0,7143	<0,0001		-3,3589	30,0329	0,0006	
	b₄	-0,0344	0,0034	<0,0001		-0,0330	0,0049	<0,0001		-0,0373	0,0047	<0,0001	
	b₅	-0,0009	0,0018	0,6491		-0,0023	0,0036	0,5249		-0,6316	29,3197	0,9824	
	b₆	3,0675	0,7497	<0,0001		2,9075	0,5511	<0,0001		0,1940	6,9966	0,7261	
	b₇	-0,1612	0,1263	0,2082		-0,0532	0,0493	0,2811		-0,3145	0,4325	0,4391	
	b₈	1,0192	0,2220	<0,0001		1,3550	0,2697	<0,0001		0,8214	0,3658	0,0182	
AD21	b₀	0,0636	0,0067	<0,0001	22,3	0,0634	0,0105	<0,0001	27,2	0,0690	0,0097	<0,0001	19,5
	b₁	0,0182	0,0028	<0,0001		0,0111	0,0032	0,0005		0,0273	0,0053	<0,0001	
	b₂	-0,0010	0,0001	<0,0001		-0,0010	0,0002	<0,0001		-0,0011	0,0002	<0,0001	

	b₃	0,1143	0,0088	<0,0001		0,1185	0,0140	<0,0001		0,1006	0,0123	<0,0001	
	b₄	-0,8075	0,0127	<0,0001		-0,8613	0,0204	<0,0001		-0,7749	0,0164	<0,0001	
AD22	b₀	0,0641	0,0275	0,0202	64,6	0,0633	0,0445	0,1561	65,5	0,0876	0,0375	0,0177	66,8
	b₁	0,0578	0,0123	<0,0001		0,0562	0,0192	0,0033		0,0639	0,0188	0,0007	
	b₂	-0,0169	0,0027	<0,0001		-0,0165	0,0041	<0,0001		-0,0192	0,0042	<0,0001	
	b₃	-0,0697	0,0163	<0,0001		-0,0773	0,0253	0,0023		-0,0768	0,0236	0,0013	
	b₄	-0,7918	0,0129	<0,0001		-0,8447	0,0205	<0,0001		-0,7528	0,0166	<0,0001	
AD23	b₀	0,1018	0,0083	<0,0001	32,9	0,1029	0,0127	<0,0001	47,1	0,0893	0,0111	<0,0001	25,1
	b₁	-0,0003	0,0001	<0,0001		-0,0003	0,0001	<0,0001		-0,0000	0,0001	0,8192	
	b₂	0,0177	0,0025	<0,0001		0,0091	0,00247	0,0002		0,0279	0,0050	<0,0001	
	b₃	-0,0017	0,0002	<0,0001		-0,0018	0,0002	<0,0001		-0,0019	0,0003	<0,0001	
	b₄	0,1277	0,0076	<0,0001		0,1470	0,0115	<0,0001		0,1069	0,0115	<0,0001	
	b₅	-0,7531	0,0121	<0,0001		-0,7746	0,0181	<0,0001		-0,7501	0,0163	<0,0001	
AD24	b₀	0,1793	0,0229	<0,0001	65,4	0,2556	0,0301	<0,0001	65,6	0,1348	0,0379	0,0005	70,7
	b₁	-0,0033	0,0005	<0,0001		-0,0040	0,0008	<0,0001		-0,0019	0,0006	0,0014	
	b₂	0,0627	0,0118	<0,0001		0,0454	0,0138	0,0010		0,0719	0,0196	0,0002	
	b₃	-0,0135	0,0021	<0,0001		-0,0098	0,0025	<0,0001		-0,0180	0,0039	<0,0001	
	b₄	-0,0707	0,0144	<0,0001		-0,0544	0,0212	0,0102		-0,0828	0,0225	0,0002	
	b₅	-0,7722	0,0126	<0,0001		-0,8064	0,0192	<0,0001		-0,7459	0,0165	<0,0001	
AD25	b₀	-3,7796	0,4573	<0,0001	13,5	-2,2362	0,6965	0,0013	14,0	-4,9191	0,6090	<0,0001	13,3
	b₁	-0,4225	0,0420	<0,0001		-0,4886	0,0568	<0,0001		-0,3795	0,0647	<0,0001	
	b₂	2,5347	0,1624	<0,0001		2,1899	0,2014	<0,0001		3,0117	0,2699	<0,0001	
	b₃	-0,0043	0,0066	0,5139		-0,0156	0,0095	0,0989		0,0034	0,0094	0,7208	
AD26	b₀	-0,6360	0,4495	0,1512	14,0	0,6825	0,6749	0,3132	14,6	-1,5006	0,6055	0,0135	14,3
	b₁	-0,1054	0,0487	0,0293		-0,1755	0,0657	0,0074		-0,0971	0,0744	0,1903	
	b₂	-0,2843	0,0246	<0,0001		-0,2910	0,0323	<0,0001		-0,2723	0,0369	<0,0001	
	b₃	0,0117	0,0070	0,0969		0,0056	0,0102	0,5876		0,0185	0,0101	0,1903	
AD27	b₀	-0,0299	0,0029	<0,0001	35,0	-0,0332	0,0040	<0,0001	33,0	-0,0274	0,0041	<0,0001	38,4
	b₁	2,8116	0,9982	0,0048		2,3002	1,4059	0,1010		2,0845	1,4639	0,1574	
	b₂	-0,5956	0,0938	<0,0001		-0,4731	0,1251	0,0002		-0,7900	0,1398	<0,0001	
	b₃	-79,4534	19,6300	<0,0001		-137,5	27,0639	<0,0001		-4,4729	29,2223	0,8782	
	b₄	3,8172	0,3073	<0,0001		4,1605	0,4374	<0,0001		4,1456	0,4544	<0,0001	
AD28	b₀	1,3613	0,0319	<0,0001	30,1	1,2301	0,0401	<0,0001	29,6	1,6110	0,0567	<0,0001	32,7
	b₁	0,8815	0,0080	<0,0001		0,9010	0,0112	<0,0001		0,8382	0,0122	<0,0001	
	b₂	-0,5822	0,2840	0,0404		1,1734	0,3714	0,0016		-2,8415	0,4300	<0,0001	
	b₃	-3,6307	0,1603	<0,0001		-3,3981	0,2340	<0,0001		-3,9377	0,2201	<0,0001	
	b₄	10,1292	1,4249	<0,0001		7,4120	2,0257	0,0003		13,5254	1,9953	<0,0001	

AD29	b_0	0,6745	0,0311	<0,0001	56,9	0,6243	0,0436	<0,0001	55,4	0,8117	0,0460	<0,0001	60,6
	b_1	0,7811	0,0084	<0,0001		0,7906	0,0118	<0,0001		0,7452	0,0126	<0,0001	
	b_2	2,7050	1,2839	0,0365		5,2916	1,6751	0,0016		-1,8779	1,9640	0,3426	
	b_3	0,4186	0,0404	<0,0001		0,4420	0,0558	<0,0001		0,4226	0,0587	<0,0001	
	b_4	99,7218	20,0978	<0,0001		94,4145	27,6530	0,0006		120,3	29,2478	<0,0001	
	b_5	-10,4000	0,4710	<0,0001		-10,5591	0,6911	<0,0001		-10,6594	0,6549	<0,0001	
AD30	b_0	1,3457	0,0471	<0,0001	65,1	1,2309	0,0622	<0,0001	69,6	1,4775	0,0734	<0,0001	64,3
	b_1	0,8463	0,0108	<0,0001		0,8845	0,0166	<0,0001		0,8003	0,0150	<0,0001	
	b_2	-0,0723	0,0079	<0,0001		-0,0936	0,0128	<0,0001		-0,0716	0,0103	<0,0001	
	b_3	0,0630	0,0062	<0,0001		0,0724	0,0091	<0,0001		0,0695	0,0087	<0,0001	
	b_4	5,3374	0,6346	<0,0001		5,9298	0,9284	<0,0001		2,5432	0,9183	0,0057	
	b_5	-6,2540	0,1035	<0,0001		-6,2014	0,1518	<0,0001		-6,2540	0,1398	<0,0001	

Analizando los valores de los estadísticos de comparación para los distintos modelos empleados en el ajuste (Tabla 2.9), se puede observar que los modelos del grupo 1 son los que han presentado peores ajustes, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por otros autores (López Sánchez *et al.*, 2003). Además, esto indica la necesidad de incluir una altura de masa como variable independiente en los modelos.

Los modelos que han presentado un mejor comportamiento de todos los estadísticos de comparación empleados (mayor R^2_{Adj} y menores $REMC$ e índice de Akaike) son los modelos AD20, AD19 y AD11, tanto para el conjunto total de los datos como para la zona de Zuera. Los tres modelos utilizan como variables regresoras de masa el diámetro medio cuadrático y la altura media, y pertenecen al grupo 2. Sorprendentemente, los modelos del grupo 3, que exigen mayor esfuerzo de muestreo y que incorporan la edad como variable adicional, no han mejorado las estimaciones respecto a los modelos del grupo 2. Esto puede deberse a dos razones: *i*) la baja fiabilidad con que se estima el valor de la edad en las masas naturales y *ii*) que este parámetro ya esté incluido implícitamente con el diámetro y la altura de masa, con lo que su incorporación como variable explícita es redundante. Sin embargo, para la zona de Alcubierre, los modelos que han presentado mejor comportamiento han sido AD20, AD25, AD5, AD19, AD26 y AD11. En este caso sí han mostrado buenos resultados algunos de los modelos del grupo 3.

Al analizar los valores de los errores estándar de los parámetros de los modelos que han presentado mejores resultados, se puede observar que en el modelo AD20 hay tres o cuatro parámetros, según zonas, no significativos a un nivel de significación del 5%, al presentar los valores de las estimaciones de los parámetros errores estándares superiores o

próximos al valor de la estimación del propio parámetro, lo cual indica que la variable asociada a dicho parámetro debe eliminarse del modelo. Adicionalmente, la multicolinealidad asociada con este modelo ha resultado ser muy alta, como se puede observar en la Tabla 2.10. El modelo AD19 ha presentado todos los parámetros significativos a un nivel de significación del 5%, y un valor de multicolinealidad mayor de 30 en los tres casos (datos combinados, Alcubierre y Zuera). Para el caso de Alcubierre, además de lo ya indicado, el modelo AD25 ha presentado también un parámetro no significativo, y el AD26 dos parámetros. El modelo AD5 ha tenido un buen comportamiento en estos estadísticos, para el caso de Alcubierre, por lo que podría ser un modelo adecuado para esta zona. Sin embargo, el modelo AD11 ha presentado un índice de condición muy bajo (1,3 en todos los casos), todos sus parámetros han sido significativos a un nivel de significación del 5 %, sólo explica un 0,21%, 0,08% y 0,38% (total de datos, Alcubierre y Zuera, respectivamente) menos de variabilidad que el modelo AD19, y para Alcubierre también sólo un 0,21% menos de variabilidad que el modelo AD5. Se ha optado finalmente por escoger un único modelo que represente tanto a los datos combinados como a cada uno de los montes por separado, siendo el modelo AD11 el más apropiado, ya que ha sido el más adecuado en dos de los tres casos.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se ha seleccionado la ecuación AD11 (Sloboda *et al.*, 1993) Mod. como función para la construcción del modelo altura-diámetro para los montes de las dos zonas del estudio. Esta ecuación proviene de una modificación de la ecuación de Michailoff (1943) que tiene su origen en la función de Korf (conocida como ecuación de Schumacher en el campo forestal), y proporciona frecuentemente buenos resultados en los ajustes a datos experimentales (López Sánchez *et al.*, 2003).

En general, los modelos que han tenido un mejor comportamiento han sido aquellos que presentan como variables independientes, además del diámetro normal, el diámetro medio cuadrático (variable que expresa la competencia, ya que depende del área basimétrica y de la densidad) y la altura media o altura dominante al mismo tiempo. Por el contrario, los que han manifestado un comportamiento peor han sido los que no emplean la altura media o altura dominante como variables independientes, lo cual coincide con lo encontrado por otros autores (Cañadas *et al.*, 1999; López-Sánchez *et al.*, 2003).

Para comprobar la validez del modelo propuesto es necesario visualizar el gráfico que enfrenta los valores observados con los valores predichos por el modelo (Figuras 2.4, 2.5 y 2.6), sobre los que se ha dibujado la diagonal (en línea discontinua) y la siguiente recta de regresión (en línea continua), junto con su R²:

$$\text{Valores observados} = a + b \cdot \text{Valores predichos} \quad (\text{ec.2.2})$$

La comparación de ambas rectas permite deducir la existencia de tendencias anómalas o sistemáticas en las predicciones del modelo.

- Este tipo de gráficos permite, por tanto, verificar de una forma rápida el cumplimiento de la mayoría de las hipótesis estructurales del análisis de regresión, y también detectar la existencia de sesgos o tendencias sistemáticas en los residuos, que causarían malas estimaciones de los modelos.

Puede observarse que en todos los casos el valor de los residuos se concentra entre un valor de ± 2 metros, y que no existen tendencias significativas del valor del residuo frente al valor de la altura predicha.

Por otra parte, tampoco se observa ninguna tendencia a sobreestimar o subestimar los valores de la altura en ninguno de los casos. Las escasas diferencias entre la diagonal y la recta de regresión entre los valores observados y predichos garantizan la ausencia de sesgo en las estimaciones de las alturas.

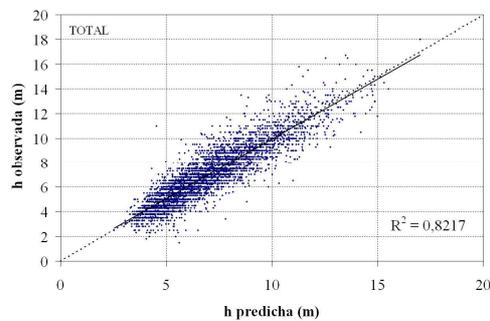


Figura 2.4. Gráfico de valores observados frente a valores predichos de la altura total para el modelo AD11 (Sloboda *et al.*, 1993) Mod. en la fase de ajuste para el total de los datos. La línea discontinua representa la diagonal y la línea continua la recta ajustada.

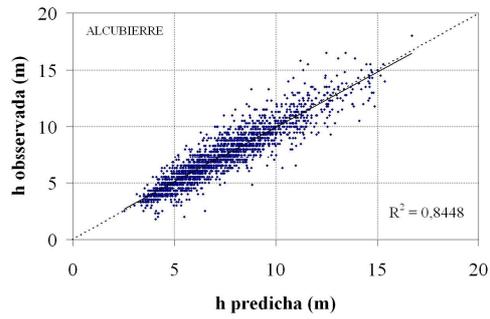


Figura 2.5. Gráfico de valores observados frente a valores predichos de la altura total para el modelo AD11 (Sloboda *et al.*, 1993) Mod. en la fase de ajuste para Alcubierre. La línea discontinua representa la diagonal y la línea continua la recta ajustada.

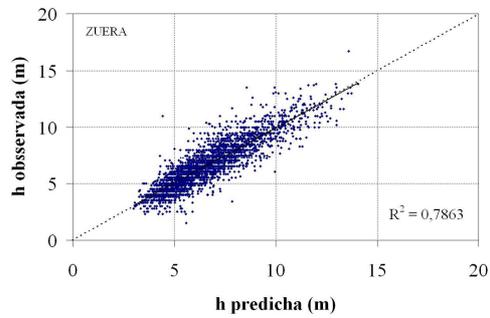
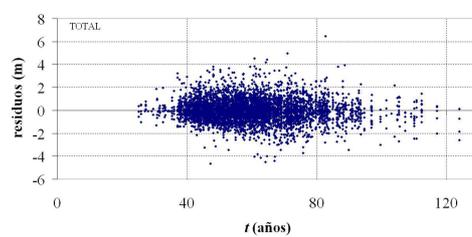
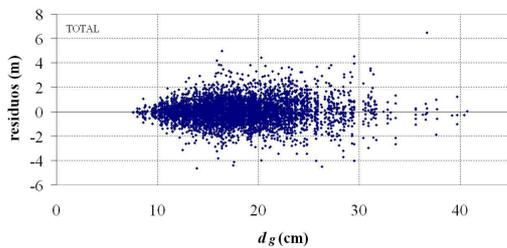


Figura 2.6. Gráfico de valores observados frente a valores predichos de la altura total para el modelo AD11 (Sloboda *et al.*, 1993) Mod. en la fase de ajuste para Zuera. La línea discontinua representa la diagonal y la línea continua la recta ajustada.

Se han representado también los residuos frente a otras variables, como son el diámetro medio cuadrático, la edad media de la parcela y el número de pies por hectárea, tanto para el conjunto total de los datos como para cada uno de los montes, no encontrándose ninguna tendencia anómala o especial, tal como puede apreciarse en las Figuras 2.7 y 2.8.



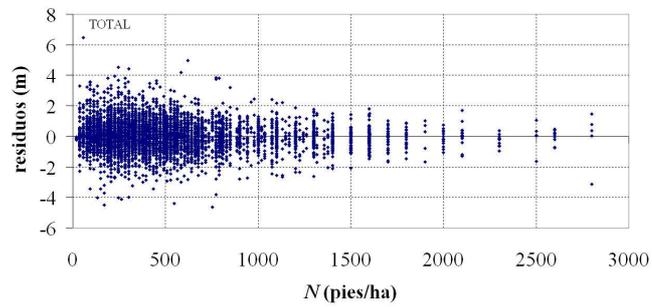


Figura 2.7. Gráficos de residuos obtenidos al aplicar el modelo AD11 (Sloboda *et al.*, 1993) Mod. frente a valores de otras variables de masa para el total de los datos.

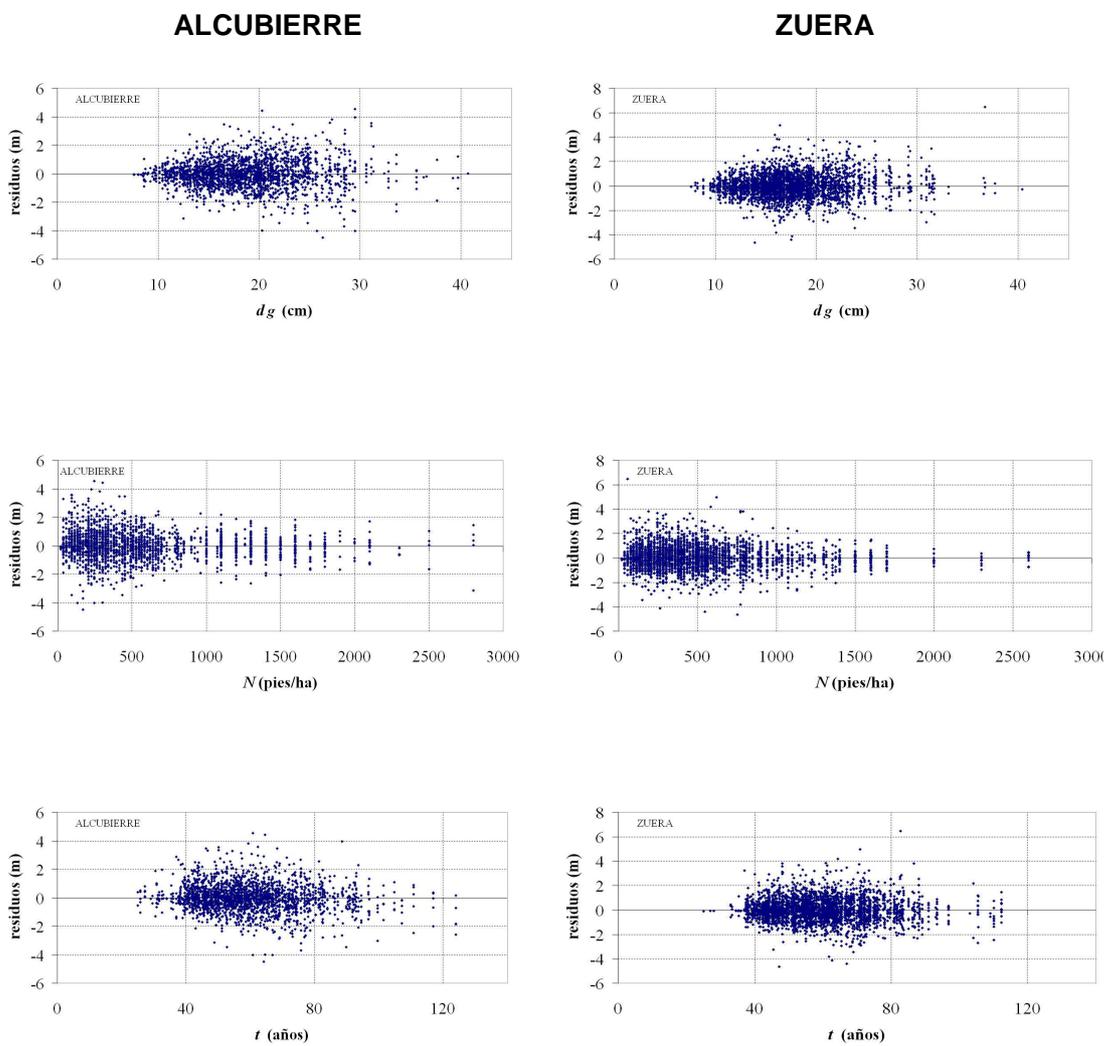


Figura 2.8. Gráficos de residuos obtenidos al aplicar el modelo AD11 (Sloboda *et al.*, 1993) Mod. frente a valores de otras variables de masa para cada una de las dos zonas de montes.

No se tiene conocimiento de que el modelo escogido haya sido utilizado por otros autores para predecir la altura de otras especies, mucho menos para *Pinus halepensis*, especie para la que no se han obtenido hasta el momento relaciones de este tipo.

En España han resultado seleccionados otros modelos de los ensayados en esta tesis para diferentes especies y zonas: el de Hui y Gadow (1993) para *Quercus robur* en Galicia (Barrio *et al.*, 2004) y el de Tomé II (1989) para *Pinus radiata*, en la misma zona (López-Sánchez *et al.*, 2003), además del obtenido por Cañadas *et al.* (1999) para *Pinus pinea* en el Sistema Central (en esta tesis denominado Cañadas *et al.* III). Sin embargo, ninguno de estos modelos han dado buenos resultados en este trabajo. Otros modelos no analizados en esta tesis han sido seleccionados para otras especies españolas, como el modelo de Schnute para *Pinus pinaster* en Galicia (Castedo *et al.*, 2005).

2.3.2. Comparación entre zonas

Para determinar si realmente los modelos de cada una de las zonas son distintos en sus parámetros se ha utilizado el test de la F , tal y como se explica en el Capítulo 1 de Introducción. El valor obtenido para la F ha sido de 4,29, valor que es mayor que el $F_{crítico}(1-\alpha; df_R - df_C; df_C) = 3,00$ a un nivel de confianza $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, este resultado sugiere que la relación altura-diámetro generalizada para cada zona es diferente, aunque por muy escaso margen.

Como se puede observar en la Tabla 2.11, sólo existen diferencias en la raíz del error medio cuadrático a partir del tercer decimal cuando se aplica el modelo de forma correcta e incorrectamente, respectivamente. Debido a ello, los valores obtenidos del Δ_{REMC} (%) han sido muy bajos y han oscilado entre el 0,07 y el 0,38%. Con estos resultados se puede concluir que aunque el Test de la F detecta diferencias significativas entre los parámetros de las dos ecuaciones, a nivel de las predicciones no se detectan tales diferencias. Por tanto, desde el punto de vista práctico se recomienda emplear la relación altura-diámetro combinada para ambas zonas.

Tabla 2.11. Valores de $REMC$ e Δ_{REMC} (%), como consecuencia de mezclar las ecuaciones, en términos de la predicción obtenida.

Ecuación	$REMC_c$	$REMC_e$	Δ_{REMC} (%)
Combinada aplicada a Alcubierre	0,9822	0,9832	0,0965
Combinada aplicada a Zuera	0,9536	0,9543	0,0713
Alcubierre aplicada a Zuera	0,9536	0,9563	0,2836
Zuera aplicada a Alcubierre	0,9822	0,9860	0,3867

2.4. Conclusiones

Se ha comprobado que una buena predicción de la altura de los árboles, empleando modelos altura-diámetro generalizados, requiere, además del diámetro normal, una altura de masa y una variable que tenga en cuenta implícita o explícitamente la densidad de la masa. En las masas naturales de pino carrasco de la zona estudiada la edad no ha aportado nada como nueva variable explicativa en los modelos. El modelo elegido para representar la relación altura-diámetro generalizada en el conjunto total de los montes, y para cada una de las zonas de forma independiente, ha sido el AD11, propuesto por Sloboda *et al.* (1993) Mod. Además, a la vista de los resultados obtenidos en la comparación por zonas, no se justifica el empleo de modelos diferentes (con parámetros diferentes) para cada una de las dos zonas de procedencia de los datos, Alcubierre y Zuera. Por tanto, se concluye que un único modelo ajustado a los datos combinados es suficiente.

Así, la expresión siguiente (ec.2.3) representa la relación altura-diámetro generalizada para el conjunto total de los montes estudiados, correspondiente al modelo AD11, propuesto por Sloboda *et al.* (1993) Mod.:

$$h = 1,3 + (H_m - 1,3) \cdot e^{0,3532 \left(1 - \frac{d_g}{d}\right)} \cdot e^{0,0315 \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d}\right)} \quad (\text{ec.2.3})$$

siendo:

h : altura total (m).

d : diámetro normal (cm).

d_g : diámetro medio cuadrático (cm).

H_m : altura media de la masa (m).

2.5. Bibliografía

- Amateis, R.L., Burkhart, H.E. y Zhang, S. (1995) TRULOB:Tree register updating for loblolly Pine (an individual tree growth and yield model for managed loblolly pine plantations). Coop. Rep. 83. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Forestry, Loblolly Pine Growth and Yield Cooperative.
- Barrio, M., Álvarez González, J.G., Díaz-Maroto, I. y López Sánchez, C. (2004) Relación altura-diámetro generalizada para *Quercus robur* L. en Galicia. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 18, 141-146.
- Bates, D.M. y Watts, D.G. (1988) Nonlinear regression analysis and its applications, John Wiley & Sons, New York.
- Burkhart, H.E. y Strub, M.R. (1974) A model for simulation of planted loblolly pine stands. In F. J., Ed. Growth Models for Tree and Stand Simulation, Royal College of Forestry, Research Note 30, Stockholm, p. 128-135.
- Calama R. y Montero G. (2004) Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. Canadian Journal Forest Reserch 34, 150-163.
- Cañadas, N., García, C. y Montero, G. (1999) Relación altura-diámetro para *Pinus pinea* L. en el Sistema central. Actas del Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes, Santiago de Compostela, Tomo I, p. 139-153.
- Castedo, F., Barrio, M., Parresol, B.R. y Álvarez González, J.G (2005) A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). Annals of Forest Science, 62(5), 455-465.
- Clutter, J.L. y Allison, B.J. (1974) A growth and yield model for *Pinus radiata* in New Zealand. In Fries, Ed. Growth Models for Tree and Stand Simulation, Royal College of Forestry, Research Note 30, Stockholm, p. 136-160.
- Corral-Rivas, J.J., Barrio-Anta, M., Aguirre-Calderón, O.A., Diéguez-Aranda, U. (2007) Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). Forestry, 80: 29-40.
- Cox, F. (1994) Modelos parametrizados de altura. Informe de convenio de investigación interpresna, 88.
- Curtis, R.O. (1967) Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. Forest Science, 13, 365-375.
- Gadow, K.v. (2001) Waldwachstum. Beilage zur Vorlesung für das Sommersemester. Universität Göttingen.

- Gaffrey, D. (1988) Forstamts-und bestandesindividuelles Sortimentierungsprogramm als Mittel zur Planung, Aushaltung und Simulation. Diplomarbeit Forsclische Fakultät, Universität Göttingen.
- Harrison, W.C., Burk, T.E. y Beck, D.E. (1986) Individual tree basal area increment and total height equations for Appalachian mixed hardwoods after thinning. *Southern Journal of Applied Forestry*, 10, 99-104.
- Hartley, H.O. (1961) The modified Gauss-Newton method for the fitting of nonlinear regression functions by least squares. *Technometrics*, 3, 269-280.
- Hohenadl, W. (1936) Die Bestandesmessung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*.
- Huang, S., Titus, S.J. y Wiens, D. (1992) Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 1297-1304.
- Hui, G. y Gadow, K. (1993) Zur Entwicklung von Einheitshöhenkurven am Beispiel der Baumart *Cunninghamia lanceolata*. *AFJZ*, 164, 218-220.
- Krenn, K. (1944) Die Bestandesmassenermittlung mit Hilfe stehender Probestämme. Frankfurt/M.
- Lenhart, J.D. (1968) Yield of old-field loblolly pine plantations in the Georgia piedmont. Ph. D. Thesis. Univ. Ga., Athens.
- López Sánchez, C., Gorgoso Varela, J., Castedo Dorado, F., Rojo Alboreca, A., Rodríguez Soalleiro, R., Álvarez González, J.G. y Sánchez Rodríguez, F. (2003) A height-diameter models for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Norwest Spain). *Annal of Forest Science*, 60, 237-245.
- Michailoff, J.L. (1943) Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. Sonderdr. Fw. Cbl. U. Tharandter Forstl. Jb. H.6.
- Mirkovich, J.L. (1958) Normale visinske krive za chrast kitnak I bukvu v NR Srbiji. *Zagreb. Glasnik sumarskog fakuleta*, 13.
- Mønness, E.N. (1982) Diameter distributions and height curves in even-aged stands of *Pinus sylvestris* L. *Medd. No. Inst. Skogforsk*, 36 (15), 1-43.
- Naslund, M. (1937) Die Durchforstungsversuche der forstlichen Versuchsanstalt Schwedens im Krefernwald. M.S.S.
- Páscoa, F. (1987) Estrutura, crescimento e produção em povoamentos de pinheiro bravo. Um modelo de simulação. Ph. D. Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Pienaar, L.V. (1991) PMRC Yield Prediction System for Slash Pine Plantations in the Atlantic COSAT Flatwoods. PMRC technical Report, Athens.

- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1997) *Mensura Forestal*. 503 p. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Costa Rica.
- SAS INSTITUTE INC., 2001. *SAS/STAT® User's Guide*. Cary, NC:SAS Institute Inc.
- Schröder, J. y Álvarez González, J.G. (2001) Developing a generalized diameter-height model for maritime pine in Northwestern Spain. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 120 (1), 18-23.
- Sloboda, V.B., Gaffrey, D. y Matsumura, N. (1993) Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände. *Allg. Forst. Jagdztg.*, 164, 225-228.
- Soares, P. y Tomé, M. (2002) Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 166, 99-109.
- TableCurves 2D™ (1989-1994) Jandel Scientific.
- Tomé, M. (1989) *Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. (1ª rotação) na região centro de Portugal*. Ph. D. Thesis, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal.

Capítulo 3. MODELIZACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DIAMÉTRICAS MEDIANTE LA FUNCIÓN WEIBULL BIPARAMÉTRICA

3.1. Introducción

Como ya se ha comentado en el Capítulo 2 (Relación altura-diámetro generalizada), el diámetro normal es la variable que se mide más fácilmente y con menor coste en los inventarios forestales, y se utiliza para la obtención de datos tan importantes como el área basimétrica o las existencias de una masa forestal. La distribución diamétrica sirve para conocer la estructura de una masa, así como para establecer la selvicultura a que debe ser sometida en función del objetivo final seleccionado. Por otra parte, permite la clasificación comercial de los productos obtenidos, así como el tipo de maquinaria a emplear en los aprovechamientos y sus rendimientos.

Las consideraciones anteriores han llevado a numerosos investigadores forestales a intentar caracterizar las distribuciones diamétricas empleando diferentes modelos matemáticos. Los primeros estudios fueron realizados por Liocourt en 1898 para masas irregulares, que fueron posteriormente desarrollados por Walter H. Meyer en 1930 y por Arthur Meyer en los años cuarenta del siglo XX, para masas regulares (Erviti, 1991). Desde entonces se han empleado numerosas funciones de densidad paramétricas para caracterizar las distribuciones diamétricas de poblaciones forestales, pero sin duda la que ha tenido mayor difusión y ha sido más utilizada es la función de distribución de Weibull, a partir de los trabajos de Bailey y Dell (1973), de obligada referencia.

El uso de la distribución Weibull se ha generalizado (Bailey y Dell, 1973; Smalley y Bailey, 1974; Clutter y Belcher, 1978; Bailey *et al.*, 1982), dada la amplia variedad de formas, escalas o posiciones diamétricas que permite modelar (Torres *et al.*, 2000; Maldonado y Návar, 2002), y ha proporcionado buenos resultados en la modelización de distribuciones diamétricas de diferentes especies, tanto coníferas como frondosas, y tanto en masas puras como mixtas (Diéguez-Aranda, 2004). Así, ha sido empleada con éxito por numerosos autores (Knoebel *et al.*, 1986; Páscoa, 1987; Ortega, 1989; Maltamo *et al.*, 1995; Álvarez González, 1997; Del Río, 1999; López Sánchez, 2000; Álvarez González *et al.*, 2002; Gorgoso, 2003; etc.), y entre ellos Erviti (1991) la utilizó para *Pinus halepensis* Mill.

Las propiedades que posee la función de Weibull y que le permiten adaptarse correctamente a la distribución diamétrica de una masa son las siguientes:

- Su flexibilidad, siendo capaz de reflejar el amplio rango de formas que puede tomar una distribución diamétrica.
- Los parámetros de la función pueden relacionarse fácilmente con variables características de la forma y de la localización de la distribución, y variar según lo hacen las características de la masa.
- La integración de su función de densidad es sencilla, con lo que se puede obtener fácilmente la proporción de masa mayor o menor de un determinado diámetro.
- Se relaciona fácilmente con los datos observados empleando los estimadores de los parámetros adecuados.

Por todo ello se ha escogido la función Weibull para modelizar las distribuciones diamétricas de *Pinus halepensis* Mill. en la zona de estudio.

Cuando se conoce la distribución diamétrica real de una masa y ésta se quiere caracterizar (modelizar) mediante una función de densidad o de distribución, existen varios métodos para estimar los parámetros:

- Los estimadores de máxima verosimilitud, con diversos procedimientos de resolución (Rennolls *et al.*, 1985; Nívar y Contreras, 2000).
- Los estimadores basados en diversos percentiles de la distribución (Bailey y Dell, 1973; Zarnoch y Dell, 1985; Shiver, 1988).
- Los estimadores obtenidos por regresión no lineal mediante el empleo de procedimientos iterativos como los de Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt, Steepest descent o DUD.
- Los métodos basados en los valores de determinados momentos de la distribución (Shifley y Lentz, 1985; Nanang, 1998; Del Río, 1999).

Si el objetivo es construir un modelo que permita estimar, para una nueva parcela o masa forestal, el número de pies en cada clase diamétrica a partir de variables de masa (lo que se conoce generalmente como desagregación), existen dos metodologías:

- Estimación de parámetros.
- Recuperación de parámetros.

La metodología de estimación de parámetros consiste en establecer relaciones entre distintas variables de masa y los parámetros de una función de densidad o de distribución. Para este propósito debe contarse con una base de datos de distribuciones diamétricas reales de diferentes parcelas, que deben caracterizarse (modelizarse) con alguna función matemática empleando alguna de las metodologías indicadas, obteniéndose así una nueva base de datos con los parámetros de la función de densidad o distribución de cada parcela. Por su parte, el método de recuperación de parámetros se basa en relacionar variables de masa con percentiles (Cao y Burkhart, 1984) o con momentos de la distribución diamétrica (Newby, 1980; Burk y Newberry, 1984) a partir de los cuales, mediante relaciones funcionales ya establecidas, se obtienen directamente los parámetros de la función de densidad o de distribución. Para este propósito también es necesario contar con una base de datos de distribuciones diamétricas reales de diferentes parcelas, para las que deben calcularse los percentiles o los momentos con los que relacionar las variables de masa. En ambas metodologías las variables de masa pueden obtenerse bien a partir de un inventario o mediante un modelo de crecimiento.

Por simplicidad, a lo largo de este trabajo se han empleado siempre frecuencias relativas o relativas acumuladas, que resultan de dividir las frecuencias absolutas y absolutas acumuladas entre el número total de veces que se presenta el fenómeno en estudio. En adelante se entiende que una función de densidad representa la frecuencia relativa de una determinada variable, mientras que la correspondiente a la frecuencia relativa acumulada se denomina función de distribución.

En esta tesis se pretende construir un modelo que permita estimar la distribución diamétrica de las masas de pino carrasco estudiadas a partir de una serie de variables dasométricas como son la altura dominante, el número de pies por hectárea y la edad, recuperando los parámetros de la función Weibull biparamétrica mediante el método de los momentos. En este capítulo se ajustan diferentes funciones para modelizar el diámetro medio, obteniendo la estimación de los parámetros y diversos estadísticos que permiten la comparación entre los diferentes modelos.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Datos empleados

Tal y como se ha explicado en el capítulo introductorio, se han empleado tanto los datos de árbol como de parcela procedentes del inventario realizado en las masas objeto de estudio durante los meses de octubre de 2001 a junio de 2002 por el Servicio Provincial de Medio Ambiente de Zaragoza. Los datos de árbol individual (diámetro normal), así como algunas de las variables dasométricas de masa (diámetro medio cuadrático, densidad, área basimétrica) proceden de los 15.554 árboles a los que solamente se les había medido el perímetro, en las 924 parcelas del inventario, correspondiendo 7.730 árboles y 485 parcelas a los montes de la zona de Alcubierre, y 7.824 árboles y 439 parcelas a los de Zuera. El resto de variables de parcela proceden de los 5.287 árboles tipo medidos también en las 924 parcelas del inventario, correspondiendo, de éstos, 2.168 árboles a Alcubierre, y 3.119 árboles a Zuera. En dicho inventario se consideraron como inventariables los árboles con diámetro normal superior a 7,5 cm.

Se ha analizado la distribución del número de pies por parcela y se ha considerado conveniente prescindir de todas aquellas parcelas que presentan un número de pies inferior a 20, dado que se estima que para un adecuado ajuste de la función Weibull deberían estar representadas, como mínimo, entre 12-20 clases diamétricas. Se han considerado clases diamétricas de 1 cm y se han seleccionado en primer lugar las parcelas con 20 o más árboles (312 parcelas) y de éstas se han rechazado 30 por presentar menos de 12 clases diamétricas. Así, finalmente el número de parcelas utilizadas para los análisis ha sido de 282, de las cuales 136 corresponden a Alcubierre y 146 a Zuera, con un total de 9.181 árboles, 4.134 de Alcubierre y 5.047 de Zuera.

En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los estadísticos descriptivos de las variables empleadas para la modelización del diámetro medio en función de otras variables de masa (referentes a las 282 parcelas), tanto para el conjunto de los datos como para cada una de las dos zonas estudiadas por separado, siendo: \bar{d} (diámetro medio aritmético, en cm), dg (diámetro medio cuadrático, en cm), G (área basimétrica, en m²/ha), H_0 (altura dominante, en m), N (número de pies por hectárea) y t (edad, en años).

Tabla 3.1. Valores de los estadísticos descriptivos del total de los datos empleados en el ajuste.

Estadísticos	\bar{d}	dg	H_0	G	N	t
Mínimo	11,50	12,10	4,43	6,51	376,60	38
Máximo	27,44	29,30	14,75	33,26	1.600,55	124
Media	17,34	18,33	7,27	15,84	612,31	64,74
Desviación estándar	2,92	3,06	1,93	5,22	205,39	14,26
Coef. de variación (%)	17	17	25	33	34	22

Tabla 3.2. Valores de los estadísticos descriptivos de los datos de Alcubierre empleados en el ajuste.

Estadísticos	\bar{d}	dg	H_0	G	N	t
Mínimo	12,25	12,70	4,65	6,51	376,60	40
Máximo	27,44	29,30	14,75	32,57	1.261,61	124
Media	17,88	18,92	7,63	16,01	572,38	66,91
Desviación estándar	3,13	3,24	2,20	5,29	154,14	15,94
Coef. de variación (%)	17	17	26	33	27	24

Tabla 3.3. Valores de los estadísticos descriptivos de los datos de Zuera empleados en el ajuste.

Estadísticos	\bar{d}	dg	H_0	G	N	t
Mínimo	11,75	12,10	4,43	7,30	376,60	38
Máximo	24,05	25,90	13,28	32,26	1.600,55	110
Media	16,84	17,79	7,87	15,68	649,51	62,73
Desviación estándar	2,62	2,78	1,78	5,17	238,21	12,19
Coef. de variación (%)	16	16	23	33	37	19

Se muestra a continuación (Figura 3.1) la distribución diamétrica, con clases diamétricas de un centímetro para el conjunto de los datos utilizados en este capítulo, así como para cada una de las zonas (Figuras 3.2 y 3.3). Puede observarse, a priori, una distribución unimodal, con asimetría a la derecha (debe observarse que el diámetro normal mínimo inventariable es 7,5 cm, de ahí que la distribución comience a partir de la clase 8). Destaca la abundancia de pies de las clases 11 y 18, en ambas zonas, y en menor medida de la clase 25 en ambos casos, así como de la 8 y 9 en Alcubierre. También se aprecia una escasez de pies a partir de la clase 33, siendo prácticamente inexistentes por encima de la 49, salvo algún ejemplar en la zona de Alcubierre.

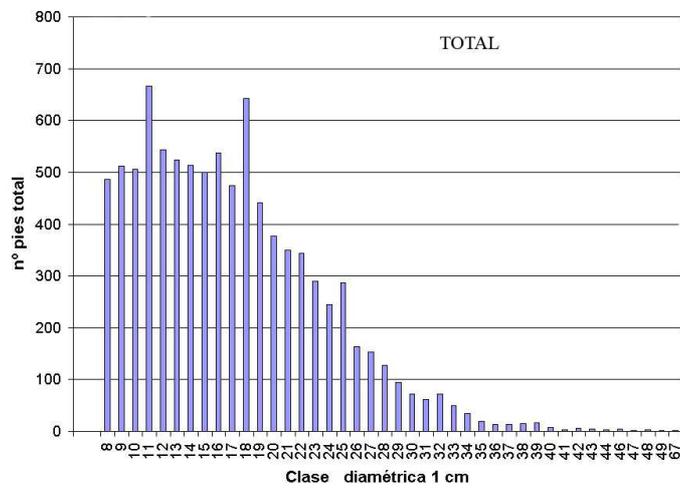


Figura 3.1. Número total de pies por clase diamétrica del total de parcelas seleccionadas.

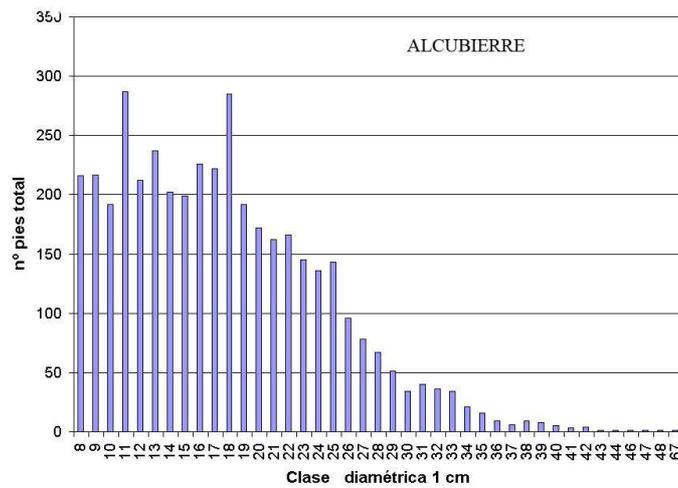


Figura 3.2. Número total de pies por clase diamétrica de las parcelas seleccionadas en la zona de Alcubierre.

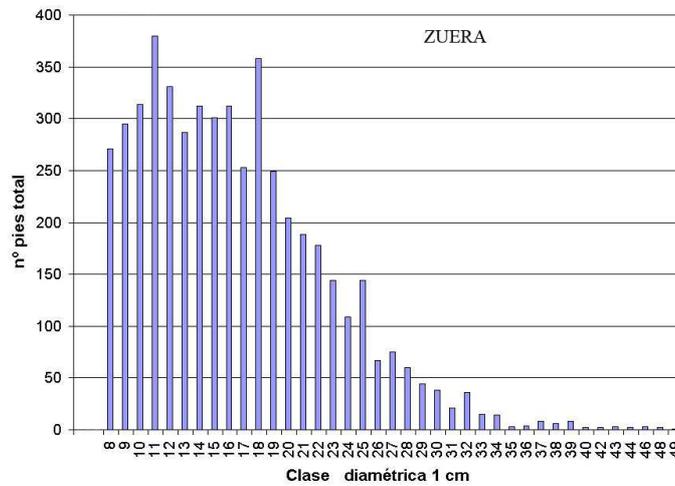


Figura 3.3. Número total de pies por clase diamétrica de las parcelas seleccionadas en la zona de Zuera.

3.2.2. La función Weibull y su relación con el diámetro medio

La distribución Weibull es una de las más utilizadas en el ámbito forestal para modelizar las distribuciones diamétricas, como ya se ha comentado en el apartado de introducción de este capítulo (3.1). La expresión de su función de densidad es la siguiente:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}, \quad x \geq 0 \quad (\text{ec.3.1})$$

donde:

x : variable aleatoria, en este caso el diámetro normal.

a : parámetro de situación que define el origen de la distribución, que en el caso de las distribuciones diamétricas coincide con el diámetro mínimo de la distribución.

b : parámetro de escala relacionado con el recorrido o rango de la distribución.

c : parámetro de forma.

e : base del logaritmo neperiano.

y tomando todos los parámetros valores positivos.

Cuando $c = 1$ la función Weibull se reduce a la exponencial y la curva es una J invertida con intercepto en y definido. Cuando $c < 1$ la función Weibull genera una curva J invertida parabólica, asintótica en ambos ejes. Cuando $c > 1$ la curva adquiere forma unimodal o de campana, de tal forma que si $c = 3,6$ la curva es esencialmente simétrica y similar a la curva normal; cuando $1 < c < 3,6$ la curva presenta simetría positiva o hacia la derecha, y si $c > 3,6$ asimetría negativa o hacia la izquierda. Cuando el parámetro de escala b crece la curva se ensancha y se aplanan (Johnson *et al.*, 2000).

Se puede conocer el número de árboles de una masa forestal que pertenecen a una determinada clase diamétrica de centro i y amplitud δ sustituyendo en la función Weibull (ec.3.1) x por i y multiplicando el resultado obtenido por el número de pies de la masa y por la amplitud de la clase considerada, teniendo en cuenta que a mayor amplitud de la clase mayor será el error en la estimación del número de pies.

Integrando la ecuación (ec.3.1) se obtiene la función de distribución Weibull $F(x)$, cuya expresión matemática resulta más sencilla:

$$F(x) = \int_0^x \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} dx = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}, \quad x \geq 0 \quad (\text{ec.3.2})$$

Considerando nuevamente que la variable en estudio es el diámetro normal, para obtener los valores estimados por el modelo hasta una determinada clase diamétrica de centro i y amplitud δ incluida, debe sustituirse en la ecuación (ec.3.2) el valor de x por el del extremo superior de esa clase diamétrica, es decir, $i + \delta / 2$. El número total de pies acumulados hasta dicha clase diamétrica se obtiene multiplicando el resultado anterior por el número total de pies de la masa.

Como ya se ha dicho en los objetivos, se pretende construir un modelo que permita estimar la distribución diamétrica de una masa a partir de una serie de variables dasométricas como son el área basimétrica, la altura dominante y el número de pies, recuperando los parámetros de la función Weibull mediante el método de los momentos. Como no es sencillo relacionar los momentos de orden mayor que dos (por ejemplo

coeficientes de asimetría o curtosis) con variables de masa (Ortega, 1989; Álvarez González, 1997; Álvarez González y Ruiz, 1998; Gorgoso, 2003), uno de los parámetros podría fijarse previamente. El procedimiento habitual consiste en fijar el parámetro de localización (a) igual al diámetro mínimo de la distribución o a cero, lo cual, según algunos autores, hace más segura la función y da más libertad al parámetro de forma (Pece *et al.*, 2000). El uso de esta condición restringe a dos los parámetros de la función Weibull, haciendo que sea más sencilla de modelizar, y proporcionando resultados similares a los de la Weibull de tres parámetros, al menos para masas regulares monoespecíficas (Maltamo *et al.*, 1995; Álvarez González, 1997; Álvarez González y Ruiz, 1998; Gorgoso, 2003).

Una vez fijado el parámetro de localización a , esta metodología de los momentos establece el siguiente sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para obtener los otros dos parámetros:

$$\bar{d} = b\tau\left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad (\text{ec.3.3})$$

$$\text{var} = b^2\left(\tau\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \tau^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)\right) \quad (\text{ec.3.4})$$

donde $\tau(i)$ es el valor de la función Gamma en el punto i , que se determina mediante la expresión:

$$\tau(i) = \int_0^{\infty} x^{i-1} e^{-x} dx \quad (\text{ec.3.5})$$

siendo x la variable aleatoria.

De esta manera quedan relacionados los momentos de primer y segundo orden (la media y la varianza, respectivamente) con los parámetros de la distribución.

Despejando b en la ecuación (ec.3.3) y sustituyendo en (ec.3.4) se obtienen las siguientes expresiones, utilizadas para la recuperación de los parámetros de la Weibull:

$$\text{var} = \frac{\bar{d}^2}{\tau^2 \left(1 + \frac{1}{c}\right)^2} \left(\tau \left(1 + \frac{2}{c}\right) - \tau^2 \left(1 + \frac{1}{c}\right) \right) \quad (\text{ec.3.6})$$

$$b = \frac{\bar{d}}{\tau \left(1 + \frac{1}{c}\right)} \quad (\text{ec.3.7})$$

Así, conocidas la media y la varianza de la distribución diamétrica, bien por los datos de un inventario específico o por las relaciones de la media con otras variables de masa, pueden obtenerse los parámetros b y c de la función Weibull, calculando primero el valor de c de la ecuación (ec.3.6) mediante un procedimiento iterativo y posteriormente, a partir de éste, el parámetro b de la ecuación (ec.3.7).

Dado que el objetivo es estimar la distribución diamétrica de la masa en función de otras variables de masa más fáciles de medir, como por ejemplo el número de pies por hectárea, el área basimétrica, la altura dominante o el diámetro medio cuadrático, o que se puedan predecir para un momento dado mediante modelos de crecimiento, se ha optado por modelizar la variable diámetro medio aritmético (\bar{d} , momento de primer orden) en función de algunas de estas variables, dado que se puede obtener la varianza (var, momento de segundo orden) en función de éste y del diámetro medio cuadrático mediante la siguiente relación:

$$\text{var} = d_g^2 - \bar{d}^2 \quad (\text{ec.3.8})$$

Para la modelización del diámetro medio se han ajustado cuatro modelos, los mismos empleados por Diéguez-Aranda (2004) para *Pinus sylvestris* en Galicia, que se muestran en la Tabla 3.4. En esta metodología se impone la condición de que el diámetro medio sea siempre inferior al diámetro medio cuadrático (Frazier, 1981), de ahí que se introduzca éste como variable independiente.

Tabla 3.4. Modelos de diámetro medio analizados

Modelo	Ref.
$\bar{d} = d_g - e^{b_0 + b_1 N + b_2 H_0 + b_3 t}$	D1
$\bar{d} = d_g - e^{b_0 + b_1 N + b_2 H_0}$	D2
$\bar{d} = d_g - e^{b_0 + b_1 N + b_2 t}$	D3
$\bar{d} = d_g - e^{b_0 + b_1 H_0 + b_2 t}$	D4

donde:

\bar{d} : diámetro medio aritmético (cm).

d_g : diámetro medio cuadrático (cm).

N : número de pies por hectárea.

H_0 : altura dominante de la masa (m).

t : edad (años).

e : es el número e .

b_0, \dots, b_n : parámetros a estimar por regresión.

3.2.3. Análisis de la bondad de las estimaciones de la función Weibull y análisis estadístico de los ajustes

Para analizar la bondad de las estimaciones de la función Weibull cuando los parámetros se recuperaron por el método de los momentos se ha utilizado la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que está basada, como otras pruebas de bondad, en varias medidas de la discrepancia entre la función de distribución empírica $F_n(x)$ y la función paramétrica propuesta $F(x)$. Dicho análisis se ha realizado utilizando el procedimiento UNIVARIATE de SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2001).

Respecto al ajuste de los modelos del diámetro medio aritmético, y dado que la mayor parte de los modelos ensayados no son lineales en los parámetros, la estimación de los mismos se ha realizado por regresión no lineal empleando el procedimiento iterativo de Gauss-Newton (Hartley, 1961). Como valores inicializadores de los parámetros en la

iteración se han empleado los obtenidos por Diéguez-Aranda (2004) para *Pinus sylvestris* en Galicia.

Para poder realizar la comparación entre los diferentes modelos se han calculado para cada uno de ellos los siguientes estadísticos: la raíz del error medio cuadrático ($REMC$), que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), que refleja la variabilidad total explicada por el modelo y que tiene en cuenta el número total de parámetros a estimar. Un modelo será mejor que otro si se obtienen menores valores de $REMC$ y mayor de R^2_{Adj} . También se ha obtenido el criterio de información de Akaike (AIC), de tal forma que un modelo será mejor que otro si obtiene un menor valor de este índice. A través del índice de condición máximo (IC) se ha analizado la existencia de multicolinealidad. Las expresiones matemáticas de todos estos estadísticos de comparación se han incluido en el Capítulo 1. Introducción.

3.2.4. Evaluación gráfica

Además se ha realizado una evaluación gráfica del modelo mediante la representación de los valores observados frente a los valores predichos y de los valores predichos de la variable dependiente frente a los residuos.

3.2.5. Comparación entre zonas

Para comprobar si existen diferencias entre las dos zonas estudiadas se han usado el test F (Bates y Watts, 1988) y el incremento en $REMC$ (Δ_{REMC} en %) (Corral-Rivas *et al.*, 2007), tal y como se ha explicado en el capítulo de Introducción.

3.3. Resultados y discusión

En la Tabla 3.5 se muestran los valores medio, máximo, mínimo y la desviación típica de los parámetros b y c obtenidos mediante el método de los momentos. El test de Kolmogorov-Smirnov sólo excluyó el 5% de las parcelas a un nivel de significación del 20%, lo que demuestra la validez de la metodología utilizada y la capacidad de la función

de Weibull para caracterizar las distribuciones diamétricas de la especie en la zona de estudio.

Tabla 3.5. Valores de los estadísticos descriptivos de los parámetros b y c obtenidos por el método de los momentos.

Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación típica
b	19,3023	30,6748	12,9124	3,2212
c	3,3629	6,4576	1,5803	0,8401

En la Tabla 3.6 se muestran los valores de los parámetros de los modelos ajustados, así como sus errores estándar, el número de condición y la probabilidad, tanto para el conjunto total de los datos como para los datos correspondientes a cada una de las zonas de Alcubierre y Zuera por separado.

Tabla 3.6. Valores de las estimaciones de los parámetros, errores estándar, niveles de significación y número de condición de los modelos ajustados, para el total de los datos y cada una de las zonas por separado.

Ref.	Parám.	TOTAL				ALCUBIERRE				ZUERA			
		Estim.	Error estándar.	Pr>t	Nº Cond.	Estim.	Error estándar.	Pr>t	Nº Cond.	Estim.	Error estándar.	Pr>t	Nº Cond.
D1	b_0	0,0446	0,1819	0,8098	15,4	0,1733	0,2611	0,5090	16,4	-0,0569	0,2795	0,8381	16,2
	b_1	-0,0008	0,0002	<,0001		-0,0008	0,0002	0,0040		-0,0007	0,0002	0,0007	
	b_2	0,0462	0,0127	0,0003		0,0379	0,0158	0,0180		0,0585	0,0227	0,0110	
	b_3	0,0002	0,0019	0,9178		0,0001	0,0029	0,9649		-0,0001	0,0035	0,9791	
D2	b_0	0,0555	0,1454	0,7067	11,3	0,1797	0,2154	0,4068	12,5	-0,0616	0,2117	0,7745	11,3
	b_1	-0,0008	0,0002	<,0001		-0,0008	0,0003	0,0036		-0,0007	0,0002	0,0007	
	b_2	0,0465	0,0124	0,0002		0,0380	0,0156	0,0162		0,0583	0,0217	0,0081	
D3	b_0	0,3272	0,1677	0,0530	12,8	0,4890	0,2323	0,0371	13,2	0,1866	0,2640	0,4810	13,8
	b_1	-0,0008	0,0002	<,0001		-0,0009	0,0003	0,0026		-0,0007	0,0002	0,0031	
	b_2	0,0018	0,0019	0,3368		0,0008	0,0022	0,7052		0,0027	0,0034	0,4262	
D4	b_0	-0,4917	0,1562	0,0019	11,6	-0,4317	0,2033	0,0354	11,3	-0,4900	0,2591	0,0607	13,0
	b_1	0,0449	0,0135	0,0010		0,0431	0,0164	0,0097		0,0419	0,0240	0,0831	
	b_2	0,0017	0,0020	0,3860		0,0015	0,0023	0,5228		0,0016	0,0036	0,6572	

Respecto al ajuste del diámetro medio en función de otras variables de masa, en la Tabla 3.7 se muestran los estadísticos utilizados para la comparación de los diferentes modelos, tanto para el conjunto total de los datos como para los datos correspondientes a cada una de las zonas de Alcubierre y Zuera por separado.

Tabla 3.7. Valores de los estadísticos de comparación de los diferentes modelos.

Ref.	Variables	TOTAL			ALCUBIERRE			ZUERA		
		REMC	R^2_{Adj}	AIC	REMC	R^2_{Adj}	AIC	REMC	R^2_{Adj}	AIC
D1	dg, N, Ho, t	0,4559	0,9756	-437,0	0,4454	0,9797	-214,0	0,4706	0,9678	-214,1
D2	dg, N, Ho	0,4551	0,9757	-439,0	0,4437	0,9799	-216,0	0,4690	0,9680	-216,1
D3	dg, N, t	0,4653	0,9746	-426,6	0,4528	0,9790	-210,5	0,4794	0,9666	-209,7
D4	dg, Ho, t	0,4746	0,9736	-415,4	0,4599	0,9784	-206,3	0,4911	0,9649	-202,7

En general, el mejor comportamiento de acuerdo al conjunto de todos los estadísticos empleados (mayor R^2_{Adj} y menor REMC e índice de Akaike) lo presenta el modelo D2, tanto para el total de los datos como para las dos zonas estudiadas independientemente, aunque los resultados son muy parecidos para todos los modelos.

Si se tienen en cuenta los valores del número de condición se puede observar que el modelo D2 es el que presenta menor valor para el conjunto total de los datos y para la zona de Zuera, y el D4 para la zona de Alcubierre. No obstante, todos ellos presentan valores muy próximos e inferiores al valor de 30, tomado habitualmente como límite de existencia de colinealidad.

Respecto a los valores del error estándar de los parámetros, se puede observar que todos los modelos presentan uno o dos parámetros no significativos a un nivel de significación del 5%. En el modelo D2 esto sólo ocurre para el parámetro b_0 , el cual no acompaña a ninguna variable, por lo que es indiferente su eliminación.

Con estos razonamientos se puede considerar como mejor modelo el D2, ya que presenta en general los mejores valores de los estadísticos y no tiene problemas de colinealidad. Además el modelo es sencillo, ya que no depende de la edad, variable más difícil de medir. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Diéguez-Aranda (2004) para *Pinus sylvestris*.

Se presentan a continuación los gráficos (Figuras 3.1 a 3.3) correspondientes a la relación entre los valores del diámetro medio aritmético predicho y observado para este modelo, tanto para el conjunto total de los datos como para cada una de las zonas. Puede observarse que no hay tendencias sistemáticas que indiquen que el modelo funciona mal en alguna región.

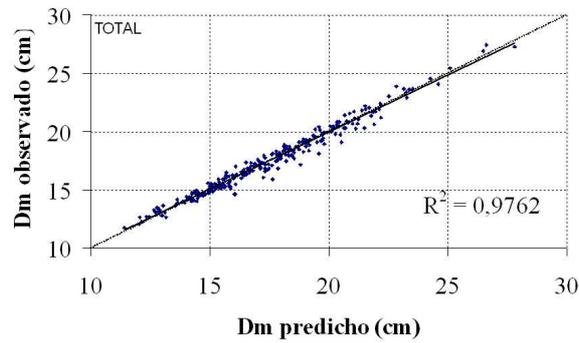


Figura 3.1. Gráfico de valores observados frente a valores predichos del diámetro medio aritmético para el modelo D2 en la fase de ajuste para el conjunto total de datos.

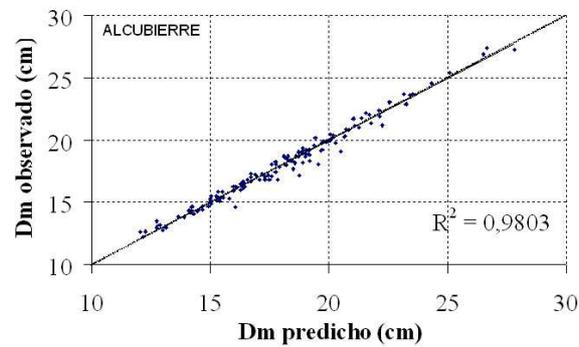


Figura 3.2. Gráfico de valores observados frente a valores predichos del diámetro medio aritmético para el modelo D2 en la fase de ajuste para Alcubierre.

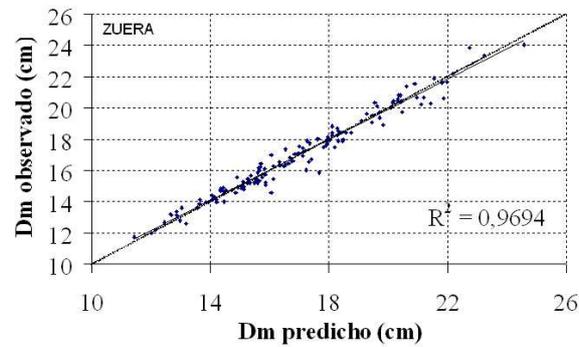


Figura 3.3. Gráfico de valores observados frente a valores predichos del diámetro medio aritmético para el modelo D2 en la fase de ajuste para Zuera.

Respecto a la comparación entre zonas, para determinar si realmente los dos modelos son distintos en sus parámetros se utilizó el test de la F , tal y como se ha explicado en el capítulo de Introducción. El valor obtenido en su cálculo fue de 0,24, muy inferior al valor crítico $F_{critico}(1-\alpha; df_R - df_C; df_C) = 2,60$ a un nivel de confianza $\alpha = 0,05$, lo que indica

que la función empleada para modelizar el diámetro medio para cada zona no es diferente.

Como se puede observar en la Tabla 3.8, los valores obtenidos del Δ_{REMC} (%) cuando se aplica el modelo correcta e incorrectamente oscilaron entre el 0,1 y el 0,66%. Los valores más bajos resultaron al aplicar el modelo combinado a cada una de las dos zonas, y fueron inferiores al 0,5%, lo que sugiere que se puede emplear este modelo para ambas zonas. Sin embargo, el mayor valor se produjo al utilizar el modelo de Zuera a los datos de Alcubierre, aunque tampoco resultó demasiado elevado.

Tabla 3.8. Valores de $REMC$ e Δ_{REMC} (%), como consecuencia de mezclar las ecuaciones, en términos de la predicción obtenida.

Ecuación	$REMC_c$	$REMC_e$	Δ_{REMC} (%)
Combinada aplicada a Alcubierre	0,4438	0,4443	0,1319
Combinada aplicada a Zuera	0,4690	0,4696	0,1242
Alcubierre aplicada a Zuera	0,4690	0,4712	0,4772
Zuera aplicada a Alcubierre	0,4438	0,4467	0,6672

3.4. Conclusiones

La distribución diamétrica de las parcelas de pino carrasco analizadas en este Capítulo se puede modelizar con la función Weibull, y el método de obtención de los parámetros de dicha distribución mediante el método de los momentos es válido para su determinación.

El modelo elegido para representar el diámetro medio, tanto para el conjunto total de los datos como para cada uno de los montes de forma independiente, ha sido el D2, y de la comparación del modelo entre zonas se ha deducido que puede emplearse una única expresión del modelo con los parámetros obtenidos al ajustar el conjunto total de los datos. Su expresión matemática es:

$$\bar{d} = d_g - e^{0,0555 - 0,0008 \cdot N + 0,0465 \cdot H_0} \quad (\text{ec.3.9})$$

siendo:

\bar{d} : diámetro medio aritmético, en centímetros.

dg : diámetro medio cuadrático, en centímetros.

H_0 : altura dominante, en metros.

N : número de pies por hectárea.

e : es el número e .

3.5. Bibliografía

- Álvarez González, J.G. (1997) Análisis y caracterización de las distribuciones diamétricas de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 270 p.
- Álvarez González, J.G. y Ruiz, A.D. (1998) Análisis y modelización de las distribuciones diamétricas de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Inv. Agra.: Sist. Recur. For., 7(1-2), 123-137.
- Álvarez González, J.G., Schröder, J., Rodríguez, R. y Ruiz, A.D. (2002) Modelling the effect of thinnings on the diameter distributions of even-aged Maritime pine stands. Forest Ecology Management, 165, 57-65.
- Bailey, R.L., Aberethy, N.C. y Jones, E.P. (1982) Diameter distribution models for repeatedly thinned slash pine plantations. USDA. For. Ser. Gen. Tech. Rep. SO-34. 53 p.
- Bailey, R.L. y Dell, T.R. (1973) Quantifying diameter distributions with the Weibull function. Forest Science, 19(2), 97-104.
- Bates, D.M. y Watts, D.G. (1988) Nonlinear regression analysis and its applications, John Wiley & Sons, New York.
- Burk, T.E. y Newberry, J.D. (1984) A simple algorithm for moment-based recovery of Weibull distribution parameters. Forest Science, 30(2), 329-332.
- Cao, Q.V. y Burkhart, H.E. (1984) A segmented distribution approach for modelling diameter frequency data. Forest Science, 30(1), 129-137.
- Castedo F., Barrio M., Parresol B.R. y Álvarez, J.G. (2005) A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). Annals of Forest Science, 62, 455-465.
- Clutter, J.L. y Belcher, D.M. (1978) Yield of site prepared slash pine plantations in lower coastal plain of Georgia and Florida. In: Growth for Long Term Forecasting for Timber Yields. Division of Forest and Wildlife Resources. Virginia Polytechnic Institute. Rep. FWS-1-78.
- Del Río, M. (1999) Régimen de claras y modelos de producción para *Pinus sylvestris* L. en los Sistemas Central e Ibérico. Tesis Doctorales INIA nº 2, Serie Forestal. 255 p.
- Diéguez-Aranda, U. (2004) Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

- Erviti, J.J. (1991) Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 319 p.
- Frazier, J.R. (1981). Compatible whole-stand and diameter distribution models for loblolly pine. Unpublished Ph. D. Thesis. VPI & SU, 125 p.
- Gorgoso, J.J. (2003) Caracterización de las distribuciones diamétricas de *Betula alba* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 176 p.
- Hartley, H.O. (1961) The modified Gauss-Newton method for the fitting of nonlinear regression functions by least squares. *Technometrics*, 3, 269-280.
- Johnson, G.A., Mantha, S.V. y Day, T.A. (2000) A spectrofluorometric survey of UV-induced blue-green fluorescence in foliage of 35 species. *Journal of Plant Physiology*, 156(2), 242-252.
- Knoebel, B.R., Burkhart, H.E. y Beck, D.E. (1986) A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar. *Forest Science, Monograph* 27, 62.
- López Sánchez, C. (2000) Caracterización de las distribuciones diamétricas de las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Estudio fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela. 183 p.
- Maldonado, D. y Nívar, J. (2002) Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. *Madera y Bosques*, 8 (1), 61-72.
- Maltamo, M., Puumalainen, J. y Päivinen, R. (1995) Comparison of Beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distributions in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. Journal Forest Research*, 10, 284-295.
- Nanang, D.M. (1998) Suitability of the Normal, Log-Normal and Weibull distributions for fitting diameter distributions of neem plantations in Northern Ghana. *Forest Ecology and Management*, 103(1), 1-7.
- Nívar, J. y Contreras, J. (2000) Ajuste de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de rodales irregulares de pino en Durango, México. *Agrociencia* (publicado como artículo), 34, 353-361.
- Newby, M. (1980) The properties of moment estimators for the Weibull distribution based on the sample coefficient of variation. *Technometrics*, 22, 187-194.
- Ortega, A. (1989) Modelos de evolución de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 294 p.
- Páscoa, F. (1987) Estructura, crecimiento e produção em povoamentos de pinheiro bravo. Um modelo de simulação. Ph. D. Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

- Pece, M.G., de Benítez, C.G. y de Galíndez, M.J. (2000) Uso de la función Weibull para modelar las distribuciones diamétricas en una plantación de *Melia azedarach*. Revista Forestal Venezolana, 44 (2), 49-52.
- Rennolls, K., Geary, D.N. y Rollison, T.J. (1985) Characterizing diameter distributions by the use Weibull distribution. Forestry Abstracts, 58(1), 57-66.
- SAS. (2001) INSTITUTE INC. SAS/STAT™ User´s Guide. Release 8.2. Cary, N.C. USA.
- Shifley, S. y Lentz, E. (1985) Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. Forest Ecology and Management, 13, 195-203.
- Shiver, B.D. (1988) Sample sizes and estimation methods for the Weibull distribution for unthinned slash pine plantation diameter distributions. Forest Science, 34(3), 809-814.
- Smalley, G.W. y Bailey, R.L. (1974) Yield tables and stand structure for loblolly pine plantations in Tennessee, Alabama and Georgia highlands. USDA. For. Ser. Res. Pap. SO-96. 81 p.
- Torres, J.M., Magaña, O.S. y Acosta, M. (2000) Metodología para mejorar la predicción de parámetros de distribuciones diamétricas. Agrociencia (publicado como ensayo), 34, 627-637.
- Zarnoch, S.J. y Dell, T.R. (1985) An evaluation of percentile and maximum likelihood estimators of Weibull parameters. Forest Science, 31, 260-268.

Capítulo 4.- FUNCIONES DE PERFIL Y TARIFA DE CUBICACIÓN

4.1. Introducción

Se ha comentado de forma general en el capítulo de Introducción la importancia de la especie desde un punto de vista superficial, ecológico y económico tanto a nivel nacional como regional. Si bien es cierto que el objetivo principal de las masas de esta especie suele ser la protección, quedando en un segundo término la producción, que en general es muy baja (Alía *et al.*, 2000), sus aprovechamientos maderables pueden ser significativos a escala local, máxime si se consideran como complementarios de otros como pastos, caza, recreo, setas, etc. Aunque la madera de pino carrasco ha sido la “cenicienta” de las coníferas españolas en la literatura forestal, el pino carrasco ha participado en el desarrollo de algunas comarcas españolas de forma crucial, bien por su madera o por su resina (García y De Palacios, 2000), caso este último de la zona de estudio en el pasado.

Para planificar y valorar adecuadamente los aprovechamientos madereros de cualquier especie es necesario estimar el volumen de los árboles y, por extensión, de la masa. Sin embargo, no resulta viable, salvo en raras excepciones, una cubicación exacta por medición directa de cada árbol, dado el tiempo que se precisa y el correspondiente elevado coste. Por esa razón se recurre a herramientas que faciliten este trabajo y permitan la cubicación del árbol y de la masa de la manera más rápida y fiable posible. Existen diferentes métodos de cubicación del árbol individual, las tarifas de cubicación clásicas y las tarifas con clasificación de productos.

Las primeras permiten estimar el volumen total de los pies de una masa con considerable exactitud. Estas tarifas de cubicación de árbol individual se pueden definir como expresiones matemáticas que permiten estimar el volumen de un árbol en función de una o más variables dendrométricas (variables de entrada) directamente medidas en él. Las tarifas se pueden presentar en forma de tabla, gráfico o en forma de ecuación matemática (Rondeux, 1993). Según el número de variables empleadas se habla de tarifas de una, de dos o de más entradas, aunque en la práctica no se usan de más de dos o tres entradas. Dichas variables de entrada son, generalmente, el diámetro normal, la altura total y, en el caso de necesitarse una tercera variable, el diámetro a una determinada altura en el fuste.

Sin embargo, las tarifas de cubicación clásicas no aportan información sobre las dimensiones de los productos a obtener. Esto ha llevado a desarrollar modelos que permitan estimar el volumen de madera de un árbol hasta un determinado diámetro o altura límite sobre el tronco, según el destino industrial que se quiera obtener. Estos modelos se denominan tarifas de cubicación con clasificación de productos, y para su construcción existen básicamente dos metodologías: las funciones de perfil del tronco y las funciones de volumen porcentual o volumen de razón (Trincado, 1997; Gadow, 2001).

Las primeras son relaciones matemáticas entre los diámetros del árbol en diferentes secciones del tronco y la altura a la que se encuentran (Newnham, 1992; Castedo y Álvarez, 2000). A partir de esta ecuación que caracteriza el perfil del tronco es posible obtener el volumen entre dos alturas cualesquiera del mismo mediante la obtención de su integral definida entre esas alturas.

Las funciones de volumen porcentual o de volumen de razón fueron introducidas por Burkhart (1977) y predicen la proporción entre el volumen comercial hasta un determinado punto del tronco y el volumen total del mismo (Cao *et al.*, 1980). De esta forma, el volumen comercial se obtiene multiplicando la razón del volumen hasta un punto determinado por el volumen total del árbol obtenido con una ecuación de volumen clásica (Barrio, 2003).

Si se comparan las funciones de perfil del tronco con las funciones de volumen de razón se puede argumentar que las primeras son, en general, más complejas, tanto en su formulación como en las metodologías de ajuste y en su posterior empleo para la obtención del volumen. Sin embargo, teóricamente deben proporcionar unas estimaciones de volumen más precisas, ya que es mejor obtener el volumen del árbol a partir del perfil del tronco que hacerlo por agrupación de los volúmenes de trozas cubicadas con la fórmula de Smalian.

En este trabajo se ha optado por la metodología basada en las funciones de perfil del tronco para la construcción de tarifas con clasificación de productos. Para ello, se han seleccionado aquellas funciones de perfil que han sido utilizadas con éxito en España en los últimos años. Concretamente, se han probado ecuaciones incluidas en los trabajos de Cervera (1973), en los de Novo *et al.* (2001; 2003) para repoblaciones de *Pinus sylvestris* en Galicia, en los de Castedo y Álvarez (2000) y Rodríguez *et al.* (2003) para *Pinus radiata* en Galicia y el País Vasco, respectivamente, y en los de Rodríguez y Molina (2003) y Rodríguez y Blanco (2001) para diferentes clones de *Populus x euroamericana* en Navarra y Huesca, respectivamente.

Hasta la fecha no se tiene constancia de la existencia de este tipo de tarifas para *Pinus halepensis*, tanto a nivel nacional como internacional, y son escasos otros trabajos relacionados con el cálculo de volumen para esta especie. Algunos trabajos previos sobre estos temas en diferentes países son: tablas de cubicación (Martínez *et al.*, 1992) y ecuaciones de volumen (Martínez *et al.*, 1993) para España; ecuaciones de volumen y tablas de producción para Italia (Castellani *et al.*, 1980); tablas de cubicación para Croacia (Benko *et al.*, 1997; Benko *et al.*, 1995; Novotny, 1990); modelos de producción y selvicultura para el Sur de Francia (Couhert y Duplat, 1993); y tablas de crecimiento para Argelia (Krstanov y Belyakov, 1988), además de las tablas de producción referenciadas en el capítulo de calidad de estación.

4.2. Material y método

4.2.1. Datos empleados

En las dos zonas de estudio donde se realizó el inventario explicado en el capítulo de Introducción se seleccionaron un total de 96 árboles repartidos proporcionalmente según las clases diamétricas existentes. De ellos, 53 árboles (un 55,2%) se localizaron en la zona de Alcubierre y los 43 restantes (un 44,8%) en la zona de Zuera.

En cada uno de los árboles seleccionados se midió el perímetro a 1,30 metros de altura y posteriormente se procedió al apeo y medición de la altura total y la altura del tocón. Cada árbol fue dividido en trozas de un metro de longitud. En cada troza se midió el perímetro (en cm) en cada una de las caras, así como el espesor de la corteza (en cruz, en mm). Finalmente se estimaron los volúmenes totales con y sin corteza cubicando cada troza por la fórmula de Smalian, a excepción del rabeón, que se asimiló a un cono.

De este modo se obtuvo una muestra de 689 pares de datos altura-diámetro a lo largo del fuste, de los cuales 374 (el 54,3%) correspondieron a los árboles de la zona de Alcubierre y 315 (el 45,7%) a la de Zuera.

En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables dendrométricas de la muestra de árboles empleados, en total y en cada una de

las dos zonas de estudio: h (altura total, en m), d (diámetro normal, en cm), V_{cc} (volumen con corteza, en dm^3), V_{sc} (volumen sin corteza, en dm^3), relación H/D (altura/diámetro) y t (edad, en años).

Tabla 4.1. Valores de los estadísticos descriptivos de la muestra total de datos empleados en los ajustes.

	h (m)	d (cm)	h/d (m/cm)	V_{cc} (dm^3)	V_{sc} (dm^3)	t (años)
Mínimo	4,86	6,37	0,29	15,15	8,40	36,00
Máximo	14,90	35,97	1,00	538,08	459,63	115,00
Media	8,06	18,68	0,47	142,40	109,55	65,34
Desviación estándar	1,87	7,19	0,15	117,46	95,29	19,40
Coef. de variación %	23,00	38,00	32,00	82,00	87,00	30,00

Tabla 4.2. Valores de los estadísticos descriptivos de la muestra de datos empleados en los ajustes de la zona de Alcubierre.

	h (m)	d (cm)	h/d (m/cm)	V_{cc} (dm^3)	V_{sc} (dm^3)	t (años)
Mínimo	4,89	6,37	0,30	29,27	21,05	36
Máximo	14,90	35,97	1,00	538,08	459,63	115
Media	7,86	18,73	0,46	151,68	117,28	70,55
Desviación estándar	1,99	7,27	0,16	127,57	104,01	19,43
Coef. de variación %	25,00	39,00	35,00	84,00	89,00	28,00

Tabla 4.3. Valores de los estadísticos descriptivos de la muestra de datos empleados en los ajustes de la zona de Zuera.

	h (m)	d (cm)	h/d (m/cm)	V_{cc} (dm^3)	V_{sc} (dm^3)	t (años)
Mínimo	4,86	7,32	0,29	15,15	8,40	37
Máximo	11,70	30,88	0,80	359,54	285,93	100
Media	8,30	18,63	0,49	130,97	100,01	58,93
Desviación estándar	1,70	7,18	0,14	104,00	83,52	17,55
Coef. de variación %	20,00	39,00	29,00	79,00	84,00	30,00

4.2.2. Modelos analizados

A partir de la bibliografía se han seleccionado 16 modelos de funciones de perfil del tronco, algunos con varias modificaciones sobre los modelos básicos. Sus expresiones matemáticas se muestran en la Tabla 4.4, junto a su referencia, variables y la categoría en la que, por sus características, se han agrupado. Todos los modelos seleccionados han sido probados por otros autores obteniendo, en general, adecuados resultados, con valores

muy aceptables de los estadísticos de comparación, aunque finalmente seleccionaran el más conveniente en cada caso. En España, por ejemplo, han sido elegidos:

- El modelo de Riemer *et al.* (1995) para *Pinus sylvestris* en Galicia (Novo *et al.*, 2001; Novo *et al.*, 2003; Diéguez-Aranda, 2004), aunque dieron resultados muy parecidos y fueron preseleccionados los modelos de Murhairwe (1999), el de Kozak (1988) y el de Bi (2000).
- El modelo de Roda (2001), no probado en este trabajo, para *Populus x euramericana* (clones I-214, Canadá y MC) en Navarra (Rodríguez y Molina, 2003), pero con pocas diferencias en exactitud y precisión con los modelos de Stud (Daquitaine *et al.*, 1999) (denominado Mod.1 en este trabajo) y Bi (2000), que sí se han ensayado.
- El modelo de Stud (denominado Mod.3 en este trabajo) para *Populus x euramericana* (clon I-214) en Huesca (Rodríguez y Blanco, 2001).
- También el modelo de Stud (denominado Mod.3 en este trabajo) para *Pinus radiata* en el País Vasco (Rodríguez *et al.*, 2003), presentando igualmente buenos resultados el de Bi (2000) y el de Hui y Gadow (1997).
- El modelo de Riemer *et al.* (1995) para *Pinus radiata* en Galicia (Castedo y Álvarez, 2000), aunque mostraran también resultados muy aceptables los modelos de Kozak (1988) y de Newnham (1988).

Además, los modelos elegidos se han seleccionado con la condición de que utilizaran las mismas variables de partida. Es decir, no se han considerado modelos en los que fuera necesario un mayor número de variables de entrada, como por ejemplo el diámetro de referencia al 20% de la altura total incluido en los modelos de Laasasenaho (1982), o la altura a la que se encuentra el primer punto de inflexión teórico de la curva de perfil del tronco en los modelos de Kozak (1988) y Pérez *et al.* (1990), con objeto de evitar una mayor complejidad en su utilización posterior.

Las categorías en las que se han agrupado los modelos son las siguientes (Castedo y Álvarez, 2000):

Grupo 1: Modelos polinómicos simples, que incluyen funciones de perfil en las que el diámetro relativo (cociente entre el diámetro a la altura h y el diámetro normal D) o su cuadrado se estiman en función de la altura relativa (cociente entre la altura h y la altura total H) mediante una única función polinómica de validez para todo el tronco del árbol. De ellos se han seleccionado para analizar en este estudio cuatro modelos, tres propuestos por Kozak *et al.* (1969) y el de Bennett y Swindel (1972).

Grupo 2: Modelos potenciales, que incluyen funciones de perfil en las que el diámetro relativo se estima en función de la altura o de la altura relativa elevada a un cierto parámetro constante. Dentro de este grupo se han analizado tres modelos propuestos por Demaerschalk (1972, 1973) y Newnham (1990).

Grupo 3: Modelos exponenciales, en los que la función de perfil presenta términos exponenciales en los que está incluida la altura como variable independiente. Se ha analizado un modelo, el propuesto por Riemer *et al.* (1995).

Grupo 4: Modelos de exponente variable, que son similares a los potenciales, pero en los que el exponente varía a medida que cambia la altura del árbol analizada, de tal forma que el exponente es una función de la altura (Forsslund, 1990). Se han analizado tres modelos que fueron propuestos por Muhairwe (1999), Kozak (1997) y Stud (Daquitaine *et al.*, 1999), que es una modificación del de Newnham (1992), y que se analiza en tres versiones diferentes, relacionando alguno de los parámetros con distintas variables del árbol, según las modificaciones propuestas por Badía *et al.* (2001), Rodríguez y Molina (2003) y Castedo (2004).

Grupo 5: Modelos trigonométricos, que se basan en el empleo de funciones trigonométricas. Dentro de este grupo se ha analizado únicamente el modelo propuesto por Bi (2000).

Grupo 6: Modelos logarítmicos, que son funciones que utilizan como variables independientes los logaritmos de las alturas relativas, en ocasiones modificadas o sujetas a otras transformaciones adicionales. Se ha analizado únicamente un modelo, el propuesto por Biging (1984).

Tabla 4.4. Funciones de perfil analizadas.

Ref.	Modelo	Expresión	Grupo y variables
FP1	Kozak <i>et al.</i> (1969)	$\left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = a_1 \cdot (T - 1) + a_2 \cdot (T^2 - 1)$	1 h_i, h, d
FP2	Kozak <i>et al.</i> (1969)	$\left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2$	1 h_i, h, d

Ref.	Modelo	Expresión	Grupo y variables
FP3	Kozak <i>et al.</i> (1969)	$\left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = a_1 \cdot (1 - 2 \cdot T + T^2)$	1 h_i, h, d
FP4	Bennett y Swindel (1972)	$\left(\frac{d_i}{d}\right) = a_1 \cdot X + a_2 \cdot \frac{(h - h_i) \cdot (h - 1,3)}{d} + a_3 \cdot \frac{(h - h_i) \cdot (h_i - 1,3) \cdot h}{d} + a_4 \cdot \frac{(h - h_i) \cdot (h_i - 1,3) \cdot (h + h_i + 1,3)}{d}$	1 h_i, h, d
FP5	Demaerschalk (1972)	$d_i = a_1 \cdot d^{a_2} \cdot (h - h_i)^{a_3} \cdot h^{a_4}$	2 h_i, h, d
FP6	Demaerschalk (1973)	$\left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = a_1 \cdot \left(\frac{X^{a_2}}{h_i}\right) + a_3 \cdot X^{a_4} + a_5 \cdot h_i \cdot X^{a_6}$	2 h_i, h, d
FP7	Newnham (1990)	$\left(\frac{d_i}{d}\right) = a_1 \cdot X^{a_2}$	2 h_i, h, d
FP8	Riemer <i>et al.</i> (1995)	$r_i = \frac{a_1 \cdot d}{1 - e^{a_3 \cdot (1,3 - h)}} + \left(\frac{d}{2} - a_1 \cdot d\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 - e^{a_2 \cdot (1,3 - h)}}\right) + e^{-a_2 \cdot h_i} \cdot \left[\frac{\left(\frac{d}{2} - a_1 \cdot d\right) \cdot e^{1,3 \cdot a_2}}{1 - e^{a_2 \cdot (1,3 - h)}}\right] - e^{a_3 \cdot h_i} \cdot \left(\frac{a_1 \cdot d \cdot e^{-a_3 \cdot h}}{1 - e^{a_3 \cdot (1,3 - h)}}\right)$	3 h_i, h, d
FP9	Muhairwe (1999)	$d_i = a_1 \cdot d^{a_2} \cdot a_3^d \cdot \left[1 - \sqrt{T}\right]^{a_4 \cdot T^2 + \frac{a_5}{T} + a_6 \cdot d + a_7 \cdot h + a_8 \cdot \frac{d}{h}}$	4 h_i, h, d
FP10	Muhairwe (1999)	$d_i = a_1 \cdot d^{a_2} \cdot \left[1 - \sqrt{T}\right]^{a_3 \cdot T + a_4 \cdot T^2 + \frac{a_5}{T} + a_6 \cdot T^3 + a_7 \cdot d + a_8 \cdot \frac{d}{h}}$	4 h_i, h, d
FP11	Kozak (1997)	$d_i = a_1 \cdot d^{a_2} \cdot h^{a_3} \cdot \left[\frac{1 - \sqrt{T}}{1 - \sqrt{\frac{1,3}{h}}}\right]^{a_4 \cdot 10 \cdot \sqrt{T} + a_5 \cdot T^4 + a_6 \cdot \arcsen(1 - \sqrt{T}) + a_7 \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{d}{h}}}\right) + a_8 \cdot d \cdot \left(\frac{1 - \sqrt{T}}{1 - \sqrt{\frac{1,3}{h}}}\right)}$	4 h_i, h, d
FP12	Bi (2000)	$\frac{d_i}{d} = \left[\frac{\ln \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot T\right)}{\ln \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1,3}{H}\right)}\right]^{a_1 + a_2 \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot T\right) + a_3 \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} \cdot T\right) + a_4 \cdot \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot T\right)}{T} + a_5 \cdot d + a_6 \cdot T \cdot \sqrt{d} + a_7 \cdot T \cdot \sqrt{h}}$	5 h_i, h, d
FP13	Biging (1984)	$d_i = d \cdot \left[a_1 + a_2 \cdot \operatorname{Ln}\left(1 - T^{\frac{1}{3}}\right) \right] \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{a_1}{a_2}\right)} \right]$	6 h_i, h, d
FP14	Stud (Daquitaine, 1999) Mod.1 Rodríguez	$d_i = (1 + a_3 \cdot e^{-a_4 \cdot T}) \cdot (a_{50} + a_{51} \cdot d) \cdot (1 - T)^{a_1 + a_2 \cdot (1 - T)}$	4 h_i, h, d

Ref.	Modelo	Expresión	Grupo y variables
	y Molina (2003)		
FP15	Stud (1999) Mod.2 Castedo (2004)	$d_i = \left(1 + a_3 \cdot e^{-a_4 \cdot T}\right) \cdot (a_5 \cdot d) \cdot (1 - T)^{a_1 + a_2 \cdot (1 - T)}$	4 h_i, h, d
FP16	Stud (1999) Mod.3 Badía <i>et al.</i> (2001)	$d_i = \left(1 + a_3 \cdot e^{-a_4 \cdot T}\right) \cdot (a_5 \cdot d) \cdot (1 - T)^{a_{10} + a_{11} \left(\frac{h}{d}\right) + a_2 \cdot (1 - T)}$	4 h_i, h, d

La terminología empleada en la descripción de los modelos de este capítulo es la siguiente:

d_i : diámetro con corteza correspondiente a la altura h_i (cm).

r_i : radio con corteza correspondiente a la altura h_i (cm).

d : diámetro normal con corteza (cm).

h_i : altura (m) desde la base del árbol hasta el punto donde se alcanza el diámetro d_i .

h : altura total del árbol (m).

a_i : coeficientes a determinar mediante los ajustes de regresión.

$$X = \frac{h - h_i}{h - 1,30} \qquad T = \frac{h_i}{h}$$

4.2.3. Metodología

4.2.3.1. Análisis estadísticos de los ajustes, selección de los modelos y evaluación gráfica

La existencia de datos con estructura jerárquica, es decir, con varias mediciones a lo largo del tronco de un mismo árbol, trae consigo el incumplimiento de la hipótesis más importante en el análisis de regresión, que es la independencia de los datos.

Aunque existe amplia literatura disponible sobre el análisis de datos jerárquicos (Davidian y Giltinan, 1995; Verbeke y Molenberghs, 2000; Diggle *et al.*, 2002), la estructura particular

del error en este tipo de datos ha sido con frecuencia ignorada en la modelización forestal (Gregorie *et al.*, 1995; Tassisa y Burkhart, 1998; Garber y Maguire, 2003), en parte porque la estimación de los parámetros por mínimos cuadrados ordinarios en presencia de autocorrelación es insesgada. Sin embargo, si se realiza el ajuste sin tener en cuenta la autocorrelación, se obtiene el estimador de la matriz de covarianzas de las estimaciones de los parámetros negativamente sesgado (subestimado), lo que provoca que los errores estándar y los p-valores asociados sean sesgados, lo que afecta al procedimiento de comparación de los modelos, aunque el estimador de los parámetros no se verá afectado y seguirá siendo insesgado (West, 1995; Garber y Maguire, 2003).

El análisis de la dependencia se ha efectuado mediante el empleo del estadístico de Durbin-Watson (*DW*). Valores pequeños de este estadístico indican alta correlación positiva, considerándose que no existe dependencia espacial o temporal cuando son próximos a 2 (Linnell, 1996; Draper y Smith, 1998). En efecto, dado que $DW \cong 2 \cdot (1 - r_1)$, siendo r_1 el coeficiente de autocorrelación de orden uno de los residuos, si r_1 es cero, el valor del estadístico *DW* es próximo a dos (Peña, 2002).

En general, se emplean dos métodos para trabajar con datos jerárquicos. El primero utiliza modelos mixtos con coeficientes fijos y aleatorios, y el segundo modelos paramétricos para la matriz de varianzas-covarianzas de los datos (Zimmerman y Nuñez-Antón, 2001; Álvarez González *et al.*, 2004). En este trabajo se ha optado por este último método por presentar una serie de ventajas (Nuñez-Antón y Zimmerman, 2001): (i) permite obtener de una forma más eficiente los estimadores de los parámetros del modelo; (ii) permite obtener estimadores más adecuados para los errores estándar de los estimadores de los parámetros de la ecuación; (iii) en muchos casos, permite solucionar de forma efectiva los problemas de falta de datos o de datos no rectangulares; y (iv) puede emplearse aún cuando el número de mediciones sea muy grande en comparación con el número de individuos.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y los buenos resultados obtenidos por otros autores con el empleo de modelos paramétricos autorregresivos (Parresol y Vissage, 1998; Garber y Maguire, 2003; Rodríguez y Molina, 2003; Diéguez-Aranda *et al.* 2006; Barrio *et al.*, 2007), se ha decidido emplear dicha metodología en este trabajo.

Debido a que los datos se han recogido a lo largo del tronco del árbol a distancias diferentes, la aplicación de estructuras autorregresivas para modelizar el error de los modelos requiere la consideración de dicha distancia (Zimmerman y Núñez-Antón, 2001). Por ello, se ha empleado un modelo autorregresivo en espacio continuo, "*continuous*

autoregressive model" (CAR) para la matriz de varianzas-covarianzas, en el que se asume que las correlaciones decrecen con el incremento de la distancia ($d_{jj'}$) entre mediciones (h_{ij}), de la siguiente manera:

$$\text{Corr}[\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij'}] = \zeta^2 \cdot \rho^{d_{jj'}}$$

donde ρ es el parámetro autorregresivo a estimar con los datos $d_{jj'} = |h_{ij} - h_{ij'}|, \forall j; j'$ es la distancia entre dos mediciones sucesivas; ζ^2 es un escalar que representa el error medio cuadrático; y ε_{ij} y $\varepsilon_{ij'}$ son los errores dentro de un árbol i en una medición a una altura j y a una altura j' (Pinheiro y Bates, 2000; Garber y Maguire, 2003).

De esta forma, cada uno de los dos parámetros de la estructura del error de un modelo continuo autorregresivo de orden 2 (CAR(2)), se eleva a la distancia que separa una medición de la anterior (d_1) y una medición de dos anteriores (d_2), expresándose de la siguiente manera:

$$Y_i = f(X_i, \beta) + \varepsilon_i \quad \varepsilon_i = \rho^{d_1} \cdot \varepsilon_{i-1} + \gamma^{d_2} \cdot \varepsilon_{i-2} + e_i \quad i=1,2,\dots,n$$

Donde Y_i es la variable dependiente; X_i el vector de la(s) variable(s) independiente(s); β el vector de los parámetros a estimar mediante el ajuste de regresión; ε_i el error bajo la condición de no independencia; e_i el error estocástico del modelo, $e_i \approx N(0, \sigma^2)$; ρ es el coeficiente de correlación entre el error de una estimación y el error de la estimación correspondiente a la medición anterior en el mismo individuo; y γ es el coeficiente de correlación entre el error de una estimación y el error de la estimación correspondiente a dos mediciones anteriores del mismo individuo. Puede avanzarse en estructuras de orden superior introduciendo más parámetros a estimar en el modelo autorregresivo. De hecho la mayor parte de los modelos en este trabajo se han ajustado con un modelo CAR(3), como puede verse en el apartado de resultados.

El estadístico de Durbin-Watson (DW) se ha calculado en función del orden de la estructura autorregresiva empleada. Sin estructura autorregresiva ($DW(0)$) o estructura de orden 1 a 3 respectivamente ($DW(1)$, $DW(2)$ y $DW(3)$).

Los modelos se han ajustado inicialmente por mínimos cuadrados ordinarios para obtener los valores de los parámetros que se utilizarán en el ajuste simultáneo de la estructura de la media (función de perfil) y la estructura del error (modelo autorregresivo). Así, los modelos lineales en los parámetros, o fácilmente linealizables mediante logaritmos, se han ajustado por regresión lineal mediante el procedimiento REG del programa SAS/STAT (2001). En cambio, en los modelos que no son lineales en los parámetros, como son los exponenciales y los trigonométricos (modelos FP8 y FP12) y los modelos FP6 y FP13, la estimación de los mismos se ha realizado por regresión no lineal empleando el algoritmo iterativo de Gauss-Newton (Hartley, 1961) mediante el procedimiento NLIN de SAS/STAT (2001). Como valores inicializadores de los parámetros en la iteración se han empleado los obtenidos por Novo *et al.* (2003), para *Pinus sylvestris*, excepto en el de Bi (2000), para el que se han empleado los obtenidos por el propio autor en Australia para 25 especies de los géneros *Eucalyptus* y *Corymbia*.

Posteriormente se ha realizado el ajuste simultáneo de la estructura de la media (función de perfil) y de la estructura del error (modelo autorregresivo) mediante el empleo del procedimiento MODEL del programa SAS/ETS (2001), que permite una actualización dinámica de los residuos.

Puesto que la estimación de los parámetros mediante el procedimiento MODEL presenta bastantes problemas de convergencia, se han utilizado los valores de los parámetros obtenidos en el paso previo (ajuste sin la estructura autorregresiva de los errores) para emplearlos como inicializadores en el ajuste simultáneo con el procedimiento MODEL.

Para poder realizar la comparación entre los diferentes modelos se han calculado para cada uno de ellos los siguientes estadísticos: la raíz del error medio cuadrático (*REMC*) que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), que refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo y que tiene en cuenta el número total de parámetros a estimar. Un modelo será mejor que otro si se obtienen menores valores de *REMC* y mayor de R^2_{Adj} . También se ha utilizado para la comparación el criterio de información de Akaike (*AIC*), de tal forma que un modelo será mejor que otro si obtiene un menor valor de este índice. Además, a través del índice de condición máximo (*IC*) se ha analizado la existencia de multicolinealidad. Sus expresiones matemáticas se han incluido en el capítulo de Introducción.

Aunque los estadísticos de bondad o de error global de los modelos son buenos indicadores de la efectividad de cada una de las ecuaciones, éstos no muestran los problemas de la capacidad predictiva de los modelos en determinadas zonas a lo largo del

tronco del árbol. Por ello, se han realizado comparaciones de los modelos mediante el análisis gráfico de la raíz del error medio cuadrático por clases de alturas relativas a lo largo del tronco.

Adicionalmente se han utilizado los gráficos de los valores observados frente a los valores predichos para los mejores modelos, con objeto de detectar posibles tendencias anómalas o sesgos en los residuos de los modelos.

4.2.3.2. Comparación entre zonas

Todos los análisis se han realizado tanto para los datos combinados (TOTAL) como para el conjunto de datos de cada zona por separado (ALCUBIERRE y ZUERA). Para comprobar si existen diferencias entre las dos zonas estudiadas se ha usado el test *F* (Bates y Watts, 1988) y el incremento en *REMC* (Δ_{REMC} en %) (Corral-Rivas *et al.*, 2007), tal y como se ha explicado en el capítulo de Introducción.

4.3.- Resultados y discusión

4.3.1. Selección del modelo

En la Tabla 4.5. se muestran los estadísticos de comparación o de bondad de ajuste obtenidos tras el ajuste de los diferentes modelos, tanto para el conjunto total de los datos como para las zonas de Alcubierre y Zuera por separado.

Tabla 4.5. Valores de los estadísticos de comparación de los diferentes modelos para el total de los datos y para cada una de las zonas por separado

Ref.	TOTAL			ALCUBIERRE			ZUERA		
	REMC	R ² _{Adj}	AIC	REMC	R ² _{Adj}	AIC	REMC	R ² _{Adj}	AIC
FP1	1,975	0,938	944,55	1,951	0,942	506,77	1,986	0,935	439,06
FP2	1,965	0,939	938,47	1,941	0,942	504,09	1,981	0,935	438,62
FP3	1,974	0,938	943,09	1,953	0,941	506,80	1,983	0,935	437,15
FP4	1,679	0,955	723,20	1,651	0,958	384,04	1,641	0,955	320,84
FP5	1,769	0,950	793,87	1,694	0,956	402,09	1,811	0,946	382,22
FP6	1,596	0,959	654,93	1,569	0,962	346,71	1,611	0,957	310,15

FP7	1,844	0,946	850,60	1,791	0,951	442,78	1,873	0,942	402,44
FP8	1,625	0,958	676,69	1,589	0,961	354,32	1,611	0,957	308,36
FP9	1,535	0,963	603,17	1,508	0,965	320,25	1,510	0,962	272,43
FP10	1,552	0,962	618,64	1,532	0,964	330,85	1,553	0,960	289,16
FP11	1,449	0,967	523,82	1,419	0,969	274,38	1,441	0,966	242,89
FP12	1,671	0,956	719,20	1,657	0,958	389,51	1,683	0,953	339,85
FP13	2,090	0,930	1.022,61	2,123	0,931	570,22	2,021	0,932	450,19
FP14	1,513	0,964	581,26	1,474	0,967	300,175	1,506	0,962	268,80
FP15	1,758	0,951	787,11	1,756	0,953	431,25	1,740	0,950	358,76
FP16	1,740	0,952	774,32	1,735	0,954	423,15	1,724	0,951	354,14

En la Tabla 4.6 se muestran los valores del estadístico de Durbin-Watson (DW), que se ha calculado en función del orden de la estructura autorregresiva empleada, tanto para el conjunto total de los datos como para las zonas de Alcubierre y Zuera por separado.

Tabla 4.6. Valores del estadístico de Durbin-Watson (DW)

Ref.	TOTAL		ALCUBIERRE		ZUERA	
	$DW(3)$	$DW(0)$	$DW(3)$	$DW(0)$	$DW(3)$	$DW(0)$
FP1	1,89	1,06	1,87	1,21	1,92	0,92
FP2	1,92	1,06	1,90	1,22	1,93	0,94
FP3	1,88	0,95	1,85	1,08	1,92	0,84
FP4	1,91	1,06	1,90	1,36	1,92	0,81
FP5	* 1,92	1,17	1,91	1,48	1,89	0,95
FP6	1,93	1,01	1,89	1,29	1,85	0,76
FP7	1,90	1,11	1,87	1,37	1,92	0,92
FP8	1,91	0,99	1,91	1,28	1,89	0,79
FP9	1,95	1,03	1,97	1,40	1,86	0,75
FP10	1,96	1,06	1,97	1,46	1,85	0,75
FP11	1,96	1,02	* 1,97	1,40	1,89	0,75
FP12	1,94	0,88	* 1,98	1,08	* 1,86	0,72
FP13	1,79	1,02	1,76	1,20	1,84	0,86
FP14	1,95	1,02	* 1,97	1,41	1,91	0,76
FP15	1,89	0,95	1,91	1,16	1,89	0,78
FP16	1,91	1,02	1,93	1,15	1,91	0,85

* Estructura del error continua autorregresiva de orden 2, CAR(2), al no ser significativo el parámetro de la estructura CAR(3).

En la Tabla 4.7. se muestran los valores de los parámetros de los modelos ajustados así como sus errores estándar, los valores del nivel de significación y el índice de condición, tanto para el conjunto total de los datos como para las zonas de Alcubierre y Zuera por separado.

Tabla 4.7. Valores de las estimaciones de los parámetros, errores estándar, niveles de significación y número de condición de los modelos ajustados, para el total de los datos y cada una de las zonas por separado.

Ref.	P.	TOTAL				ALCUBIERRE				ZUERA			
		Estim.	Error estándar.	Pr>t	Nº Cond.	Estim.	Error estándar.	Pr>t	Nº Cond.	Estim.	Error estándar.	Pr>t	Nº Cond.
FP1	a_1	-3,0598	0,0655	<,0001	8,9	-3,0397	0,0842	<,0001	9,3	-3,0768	0,1002	<,0001	8,7
	a_2	1,5183	0,0462	<,0001		1,4917	0,0592	<,0001		1,5460	0,0708	<,0001	
	ρ	0,4456	0,0384	<,0001		0,3515	0,0531	<,0001		0,5362	0,0560	<,0001	
	γ	0,5243	0,0409	<,0001		0,4419	0,0655	<,0001		0,5848	0,0552	<,0001	
	δ	0,5603	0,0448	<,0001		0,4963	0,0777	<,0001		0,6036	0,0575	<,0001	
FP2	a_1	1,5660	0,0242	<,0001	28,8	1,5745	0,0314	<,0001	29,5	1,5484	0,0370	<,0001	29,0
	a_2	-3,2288	0,0879	<,0001		-3,2079	0,1135	<,0001		-3,2176	0,1360	<,0001	
	a_3	1,6972	0,0787	<,0001		1,6664	0,1007	<,0001		1,7002	0,1236	<,0001	
	ρ	0,4636	0,0385	<,0001		0,3763	0,0532	<,0001		0,5426	0,0564	<,0001	
	γ	0,5302	0,0411	<,0001		0,4494	0,0655	<,0001		0,5866	0,0560	<,0001	
	δ	0,5544	0,0463	<,0001		0,4860	0,0820	<,0001		0,6011	0,0586	<,0001	
FP3	a_1	1,5498	0,0211	<,0001	1,7	1,5610	0,0269	<,0001	1,6	1,5254	0,0326	<,0001	1,9
	ρ	0,4521	0,0384	<,0001		0,3712	0,0531	<,0001		0,5322	0,0559	<,0001	
	γ	0,5296	0,0405	<,0001		0,4616	0,0628	<,0001		0,5822	0,0552	<,0001	
	δ	0,5627	0,0445	<,0001		0,5090	0,0739	<,0001		0,6036	0,0573	<,0001	
FP4	a_1	1,0287	0,0070	<,0001	17,9	1,0447	0,0078	<,0001	19,8	1,0034	0,0118	<,0001	19,2
	a_2	-0,1821	0,0373	<,0001		-0,0760	0,0383	0,0482		-0,5322	0,0915	<,0001	
	a_3	-0,0424	0,0067	<,0001		-0,0425	0,0072	<,0001		-0,0195	0,0134	0,1475	
	a_4	0,0366	0,0035	<,0001		0,0307	0,0040	<,0001		0,0453	0,0060	<,0001	
	ρ	0,4720	0,0390	<,0001		0,3240	0,0545	<,0001		0,6103	0,0568	<,0001	
	γ	0,5407	0,0416	<,0001		0,3718	0,0819	<,0001		0,6594	0,0514	<,0001	
	δ	0,5648	0,0464	<,0001		0,4074	0,1229	0,0010		0,6425	0,0534	<,0001	
FP5	a_1	2,7557	0,1593	<,0001	40,9	2,5408	0,1535	<,0001	40,3	3,0391	0,3430	<,0001	46,9
	a_2	0,7729	0,0269	<,0001		0,7940	0,0316	<,0001		0,7673	0,0433	<,0001	
	a_3	1,0147	0,0180	<,0001		0,9695	0,0196	<,0001		1,0594	0,0307	<,0001	
	a_4	-1,0493	0,0434	<,0001		-1,0003	0,0460	<,0001		-1,1297	0,0832	<,0001	
	ρ	0,4767	0,0384	<,0001		0,2921	0,0536	<,0001		0,5962	0,0555	<,0001	

	γ	0,4926	0,0406	<,0001		0,3107	0,0900	0,0006		0,5850	0,0500	<,0001	
FP6	a_1	0,0279	0,0102	0,0065	16,2	0,0147	0,0087	0,0899	17,0	0,0520	0,0252	0,0399	17,7
	a_2	4,2915	2,1473	0,0461		6,8573	3,3804	0,0432		1,9939	3,0130	0,5086	
	a_3	0,9422	0,0250	<,0001		0,9805	0,0294	<,0001		0,8706	0,0442	<,0001	
	a_4	1,6926	0,0472	<,0001		1,6951	0,0536	<,0001		1,6501	0,0768	<,0001	
	a_5	0,0218	0,0152	0,1506		0,0206	0,0215	0,3393		0,0321	0,0225	0,1555	
	a_6	21,0894	2,9592	<,0001		20,7436	4,5078	<,0001		21,0364	3,0171	<,0001	
	ρ	0,4327	0,0391	<,0001		0,3053	0,0539	<,0001		0,5155	0,0560	<,0001	
	γ	0,5236	0,0422	<,0001		0,3345	0,0859	0,0001		0,6193	0,0472	<,0001	
	δ	0,5638	0,0455	<,0001		---	---	---		---	---	---	
FP7	a_1	1,0646	0,0068	<,0001	1,8	1,0626	0,0080	<,0001	1,5	1,0636	0,0109	<,0001	1,9
	a_2	1,0319	0,0193	<,0001		0,9869	0,0212	<,0001		1,0802	0,0336	<,0001	
	ρ	0,4588	0,0386	<,0001		0,3045	0,0537	<,0001		0,5845	0,0558	<,0001	
	γ	0,5239	0,0413	<,0001		0,3654	0,0796	<,0001		0,6191	0,0528	<,0001	
	δ	0,5346	0,0496	<,0001		0,3865	0,1301	0,0032		0,6033	0,0578	<,0001	
FP8	a_1	0,4893	0,00646	<,0001	26,3	0,4876	0,00859	<,0001	22,2	0,5000	0,0000	<,0001	48,9
	a_2	1,9362	0,4532	<,0001		1,8401	0,5117	0,0004		7,8830	1,4333	<,0001	
	a_3	0,0559	0,0104	<,0001		0,0625	0,0125	<,0001		0,0339	0,0114	0,0032	
	ρ	0,4202	0,0387	<,0001		0,3024	0,0541	<,0001		0,5270	0,0555	<,0001	
	γ	0,5156	0,0425	<,0001		0,3666	0,0815	<,0001		0,6407	0,0503	<,0001	
	δ	0,5843	0,0426	<,0001		0,4777	0,0879	<,0001		0,6625	0,049	<,0001	
FP9	a_1	2,4060	0,4088	<,0001	147,3	2,3755	0,4675	<,0001	149,1	1,8231	0,5259	0,0006	166,5
	a_2	0,8403	0,0842	<,0001		0,8499	0,0957	<,0001		0,9471	0,1495	<,0001	
	a_3	0,9936	0,0042	<,0001		0,994305	0,0046	<,0001		0,9877	0,0078	<,0001	
	a_4	0,2196	0,0503	<,0001		0,2108	0,0608	0,0006		0,2798	0,0816	0,0007	
	a_5	-0,0126	0,0034	0,0002		-0,0089	0,0042	0,0356		-0,0220	0,0056	0,0001	
	a_6	-0,0377	0,0034	<,0001		-0,0346	0,0036	<,0001		-0,0382	0,0062	<,0001	
	a_7	0,0775	0,0067	<,0001		0,0748	0,0073	<,0001		0,0687	0,0118	<,0001	
	a_8	0,2823	0,0211	<,0001		0,2646	0,0227	<,0001		0,2998	0,0421	<,0001	
	ρ	0,4729	0,0387	<,0001		0,3358	0,0546	<,0001		0,5272	0,0554	<,0001	
	γ	0,5468	0,0409	<,0001		0,3624	0,0840	<,0001		0,6226	0,0526	<,0001	
	δ	0,5664	0,0461	<,0001		0,3369	0,1779	0,0591		0,6844	0,0470	<,0001	
	FP10	a_1	2,4724	0,1457		<,0001	92,68	2,4756		0,1814	<,0001	121,0	
a_2		0,7179	0,0194	<,0001	0,7281	0,0242		<,0001	0,7139	0,0297	<,0001		
a_3		2,598	0,2624	<,0001	2,7600	0,3346		<,0001	2,5278	0,4271	<,0001		
a_4		-4,6419	0,6357	<,0001	-4,9000	0,8394		<,0001	-4,6782	1,0605	<,0001		
a_5		-0,0274	0,0033	<,0001	-0,0229	0,0041		<,0001	-0,0336	0,0054	<,0001		

	a_6	3,1026	0,4539	<,0001		3,2165	0,6038	<,0001		3,2315	0,7602	<,0001	
	a_7	-0,0066	0,0016	<,0001		-0,0047	0,0016	0,0026		-0,0110	0,0034	0,0014	
	a_8	0,0340	0,0209	0,1041		0,0065	0,0197	0,7425		0,0819	0,0401	0,0423	
	ρ	0,4499	0,0395	<,0001		0,2918	0,0562	<,0001		0,5325	0,0563	<,0001	
	γ	0,5280	0,0427	<,0001		0,298358	0,0997	0,0030		0,604289	0,0492	<,0001	
	δ	0,5599	0,0475	<,0001		---	---	---		---	---	---	
FP11	a_1	1,0440	0,0631	<,0001	43,0	1,1198	0,0675	<,0001	43,4	0,9554	0,1151	<,0001	48,0
	a_2	0,8725	0,0265	<,0001		0,8772	0,0307	<,0001		0,8667	0,0428	<,0001	
	a_3	0,1559	0,0351	<,0001		0,1239	0,0380	0,0012		0,1943	0,0663	0,0036	
	a_4	0,0280	0,0048	<,0001		0,0320	0,0058	<,0001		0,0229	0,0078	0,0035	
	a_5	0,2921	0,0769	0,0002		0,2268	0,0971	0,0201		0,4000	0,1211	0,0011	
	a_6	1,0735	0,0650	<,0001		0,9961	0,0743	<,0001		1,1705	0,1156	<,0001	
	a_7	0,0235	0,1797	0,8962		0,0737	0,2085	0,7240		-0,1199	0,2921	0,6817	
	a_8	-0,0229	0,0031	<,0001		-0,0210	0,0037	<,0001		-0,0244	0,0055	<,0001	
	ρ	0,4385	0,0392	<,0001		0,3054	0,0549	<,0001		0,5119	0,0567	<,0001	
	γ	0,5387	0,0413	<,0001		0,3545	0,0863	<,0001		0,6152	0,0526	<,0001	
	δ	0,5692	0,0457	<,0001		0,3338	0,1840	0,0706		0,684	0,0462	<,0001	
FP12	a_1	1,3047	0,3707	0,0005	188,1	1,0858	0,4585	0,0184	175,1	1,7807	0,6971	0,0111	237,9
	a_2	-0,3631	*0,1893	0,0555		-0,3698	0,2329	0,1133		-0,1967	0,3698	0,5952	
	a_3	-0,1139	0,0443	0,0104		-0,1288	0,0596	0,0314		-0,0894	0,0685	0,1929	
	a_4	-0,4303	0,2257	0,057		-0,2895	0,2739	0,2913		-0,7423	0,4366	0,0902	
	a_5	-0,0105	0,00086	<,0001		-0,0101	0,00115	<,0001		-0,0109	0,0013	<,0001	
	a_6	0,3129	0,0514	<,0001		0,2897	0,0605	<,0001		0,3508	0,0909	0,0001	
	a_7	-0,3378	0,1075	0,0018		-0,2941	0,1144	0,0105		-0,4848	0,2425	0,0465	
	ρ	0,6574	0,0397	<,0001		0,5656	0,0555	<,0001		0,7469	0,0580	<,0001	
	γ	0,6948	0,0355	<,0001		0,6020	0,0565	<,0001		0,7593	0,0489	<,0001	
	δ	0,6282	0,0394	<,0001		0,7921	0,0295	<,0001		0,6942	0,0480	<,0001	
FP13	a_1	1,3816	0,0123	<,0001	3,89	1,3744	0,0159	<,0001	4,15	1,3923	0,0186	<,0001	3,7
	a_2	0,4250	0,0073	<,0001		0,4177	0,0093	<,0001		0,4368	0,0113	<,0001	
	ρ	0,4508	0,0413	<,0001		0,3440	0,0585	<,0001		0,5632	0,0581	<,0001	
	γ	0,5337	0,0436	<,0001		0,4320	0,0739	<,0001		0,6132	0,0560	<,0001	
	δ	0,5721	0,0463	<,0001		0,4878	0,0880	<,0001		0,6252	0,0564	<,0001	
FP14	a_1	0,8678	0,0364	<,0001	78,3	0,8669	0,0436	<,0001	93,67	0,8611	0,0621	<,0001	81,6
	a_2	-0,9787	0,4288	0,0228		-0,9098	0,5666	0,1092		-1,2596	0,6928	0,07	
	a_3	0,6563	0,2789	0,0189		0,5926	0,3535	0,0945		0,8669	0,5191	0,0959	
	a_4	7,3013	1,4326	<,0001		7,4274	2,2683	0,0012		7,0112	1,4575	<,0001	
	a_{50}	3,7812	0,694	<,0001		3,6329	0,8724	<,0001		3,4855	1,0436	0,0009	

	a_{51}	0,6371	0,1110	<,0001		0,6823	0,1565	<,0001		0,5518	0,1579	0,0005	
	ρ	0,4732	0,0389	<,0001		0,3227	0,0545	<,0001		0,5736	0,0563	<,0001	
	γ	0,5436	0,0412	<,0001		0,3193	0,0914	0,0005		0,6377	0,052	<,0001	
	δ	0,5706	0,0451	<,0001		---	---	---		0,6699	0,0478	<,0001	
FP15	a_1	0,8821	0,0382	<,0001	64,1	0,8837	0,0473	<,0001	66,1	0,8773	0,0636	<,0001	68,7
	a_2	-0,8335	0,4402	0,0587		-0,7906	0,5689	0,1654		-1,0198	0,7166	0,1558	
	a_3	0,5659	0,2535	0,0259		0,5223	0,3158	0,099		0,6989	0,4601	0,1298	
	a_4	7,9484	1,984	<,0001		8,1224	2,9828	0,0068		7,5985	2,2695	0,0009	
	a_5	0,8582	0,1439	<,0001		0,8895	0,1917	<,0001		0,7833	0,2184	0,0004	
	ρ	0,4490	0,0388	<,0001		0,3680	0,0542	<,0001		0,5234	0,0565	<,0001	
	γ	0,5224	0,042	<,0001		0,4211	0,072	<,0001		0,5986	0,0541	<,0001	
δ	0,5826	0,0425	<,0001	0,5044	0,0785	<,0001	0,6380	0,052	<,0001				
FP16	a_{10}	1,1222	0,069	<,0001	68,2	1,1186	0,0811	<,0001	72,74	1,1359	0,1156	<,0001	70,7
	a_{11}	-0,6049	0,1411	<,0001		-0,6005	0,1642	0,0003		-0,6383	0,2339	0,0067	
	a_2	-0,8020	0,4218	0,0577		-0,7849	0,5532	0,1568		-0,9379	0,6727	0,1643	
	a_3	0,5481	0,2361	0,0205		0,5191	0,3032	0,0877		0,6480	0,4081	0,1134	
	a_4	8,1361	2,0516	<,0001		8,2551	3,0058	0,0063		7,8651	2,4735	0,0016	
	a_5	0,8688	0,1376	<,0001		0,8918	0,1852	<,0001		0,8084	0,2069	0,0001	
	ρ	0,4254	0,0389	<,0001		0,3396	0,0543	<,0001		0,4984	0,0568	<,0001	
	γ	0,4976	0,0437	<,0001		0,3791	0,0791	<,0001		0,5768	0,0558	<,0001	
	δ	0,5657	0,0447	<,0001		0,4661	0,0914	<,0001		0,6275	0,0536	<,0001	

En la Tabla 4.8 se muestra, para todo el conjunto de datos, la evolución del estadístico de Durbin-Watson (DW) en función del orden de la estructura autorregresiva empleada. Como se puede observar, a excepción del modelo FP5, ha sido necesaria una estructura del tipo CAR(3) para conseguir una satisfactoria corrección del problema de autocorrelación. Analizando esto por zonas, en el caso de Alcubierre fue suficiente un CAR (2) en tres modelos y en uno en la zona de Zuera.

Tabla 4.8. Evolución del estadístico de Durbin-Watson en función del orden de la estructura de error continua autorregresiva para el conjunto total de datos.

Modelo	Referencia	$DW(0)$	$DW(1)$	$DW(2)$	$DW(3)$
Kozak (1969)	FP1	1,06	1,74	1,86	1,89
Kozak <i>et al.</i> (1969)	FP2	1,06	1,77	1,90	1,92
Kozak <i>et al.</i> (1969)	FP3	0,95	1,71	1,85	1,88
Bennett y Swindel (1972)	FP4	1,06	1,76	1,89	1,91
Demaerschalk (1972)	FP5	1,17	1,79	1,92	---

Demaerschalk (1973)	FP6	1,01	1,78	1,91	1,93
Newnham (1990)	FP7	1,11	1,76	1,88	1,90
Riemer <i>et al.</i> (1995)	FP8	0,99	1,78	1,90	1,91
Muhairwe (1999)	FP9	1,03	1,79	1,92	1,95
Muhairwe (1999)	FP10	1,06	1,81	1,94	1,96
Kozak (1997)	FP11	1,02	1,80	1,93	1,96
Bi (2000)	FP12	0,88	1,66	1,87	1,94
Biging (1984)	FP13	1,02	1,67	1,78	1,79
Stud(1999)	FP14	1,02	1,79	1,92	1,95
Stud(1999)	FP15	0,95	1,75	1,87	1,89
Stud(1999)	FP16	1,02	1,79	1,90	1,91

Analizando los valores de los estadísticos de comparación para los distintos modelos empleados en el ajuste (Tabla 4.5), se puede observar que los modelos del grupo 4 son los que presentan mejores ajustes, tanto para el conjunto total de datos como para cada una de las zonas independientemente, lo cual concuerda en parte con los resultados obtenidos por otros autores (p.e. Novo *et al.*, 2003), seguidos de un modelo del grupo 2 y otro del 3 y posteriormente del 5 ó el 1, según se trate del conjunto total de datos o de cada una de las zonas por separado.

Los modelos que presentan un mejor comportamiento de todos los estadísticos de comparación empleados (mayor R^2_{Adj} y menor $REMC$ e índice de Akaike) son los modelos FP11, FP14, FP9, FP10, FP6 y FP8, sin encontrar diferencias en la secuencia de orden según se trate del total de datos o de las dos zonas por separado. Este comportamiento se mantiene, en general, para el resto de modelos con pequeñas variaciones de un nivel en la secuencia de orden según de que zona se trate.

Si se considera exclusivamente el estadístico R^2_{Adj} , se puede observar que en 14 de los 16 modelos analizados su valor es superior en la zona de Alcubierre, seguido del conjunto total de datos y posteriormente de la zona de Zuera. Sólo los modelos FP4 y FP13 presentan una secuencia diferente.

En cuanto a la raíz del error medio cuadrático, en general los menores valores corresponden a la zona de Alcubierre en 12 de los modelos, seguida del conjunto total de datos en 7 de estos modelos y de la zona de Zuera en 5 de ellos.

En cuanto al índice de Akaike, para todos los modelos el menor valor se da en la zona de Zuera seguida de la de Alcubierre, y después en el conjunto total de datos.

Los modelos FP11, FP9 y FP10 incluyen el coeficiente de esbeltez, variable que está fuertemente correlacionada con el ratio de copa viva (Burkhart y Walton, 1985; Muhairwe, 1994), que a su vez es una variable que puede contribuir a mejorar la capacidad predictiva de una función de perfil (Newnham, 1992). Sin embargo, en el modelo FP11 ha sido precisamente el parámetro asociado al coeficiente de esbeltez el que ha resultado no significativo a un nivel del 5%, ocurriendo esto incluso con otras alternativas de utilización de este coeficiente en el exponente, tanto multiplicado directamente por el parámetro como a través de la exponencial pero sin inversa ($a_7 \cdot d/h$; $a_7 \cdot \exp(d/h)$).

Al analizar los valores del índice de condición se puede observar que existen importantes diferencias en la multicolinealidad. En general, la mitad de los modelos tienen un valor de índice de condición inferior a 30, considerado habitualmente como límite para la existencia de multicolinealidad, tal y como se ha explicado en el capítulo de Introducción. Sólo los modelos FP6 y FP8 (excepto para la zona de Zuera para el FP8), de los que presentan mejores valores de los estadísticos, se encuentran en este grupo. Para el modelo FP11 se obtiene un valor superior a 30 pero no muy alejado del mismo. El modelo FP14 arroja un valor del índice entre 78,3 y 93,6 según las zonas, y además presenta dos parámetros no significativos, tanto para Alcubierre como para Zuera, por lo que va a ser descartado aunque para el conjunto total de datos los parámetros sí sean todos significativos. El FP9 presenta un elevado valor del índice, bastante superior a 100, y el modelo FP10 muy próximo a este valor, superándolo considerablemente para la zona de Alcubierre, por lo que también se ha optado por descartar esos dos modelos por su elevado índice de condición. El modelo FP12 presenta un problema de multicolinealidad elevada, habiendo sido rechazado también por este motivo por Rodríguez y Molina (2003) para *Populus x euramericana*.

Casi todos los parámetros de los diferentes modelos ensayados son significativos a un nivel de significación del 5%, pero centrándose en los modelos preseleccionados previamente sólo el modelo FP8 tiene todos los parámetros significativos a un nivel de 5%. El modelo FP11 presenta un parámetro (el a_7) no significativo a un nivel del 5%. El modelo FP6 también tiene un parámetro no significativo para el conjunto total de datos (a_5), otro distinto para la zona de Alcubierre (a_1), y dos para la zona de Zuera (a_2 y a_5). El modelo FP14 tiene dos parámetros no significativos (a_2 y a_3) para ambas zonas por separado y ninguno para el ajuste de todos los datos juntos, y además la eliminación de estos parámetros afectaría de forma significativa a la idea inicial del modelo.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se ha seleccionado a priori el modelo FP8, y se ha comparado con los que le siguen en el comportamiento general de todos los estadísticos de comparación empleados (mayor R^2_{Adj} y menor $REMC$ e índice de Akaike) que son el FP4, FP12, FP5 y FP7 (esta secuencia solo cambia para el conjunto total de datos antecediendo el FP12 al FP4). De estos modelos el FP4 presenta un parámetro no significativo a un nivel de significación del 5% para el caso del ajuste de los datos de Zuera, y el FP12 tiene dos y tres parámetros no significativos al mismo nivel de significación, según los casos, y además tiene valores del índice de condición muy elevados. Los modelos FP5 y FP7 no presentan ningún problema en los parámetros, y en cuanto al índice de condición sólo el FP5 tienen valores algo superiores al límite establecido de 30.

Se han descartado, por lo tanto, los modelos FP4 y FP12 por los problemas comentados en el párrafo anterior y se ha representado la evolución de la raíz del error medio cuadrático ($REMC$) por clases de alturas relativas para los modelos FP8, FP5 y FP7, tanto para el conjunto total de datos como para cada una de las zonas independientemente (Figuras 4.1 a 4.3).

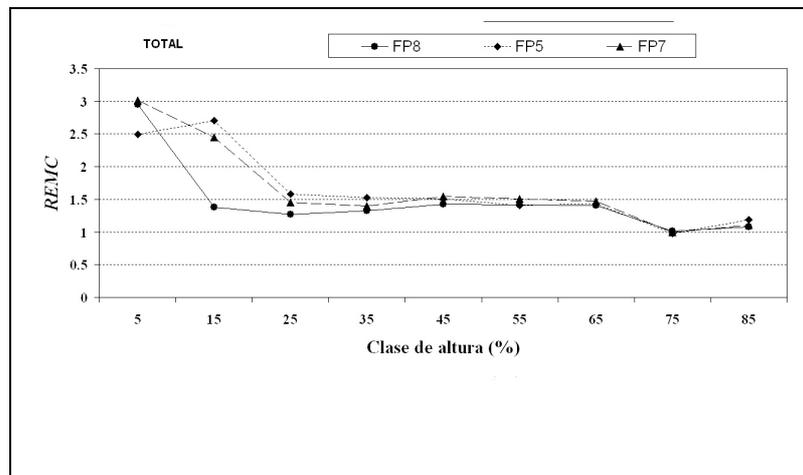


Figura 4.1. Tendencias de la raíz del error medio cuadrático ($REMC$) a lo largo del tronco, en intervalos de altura relativa de un 10%, para los modelos preseleccionados para el conjunto total de datos.

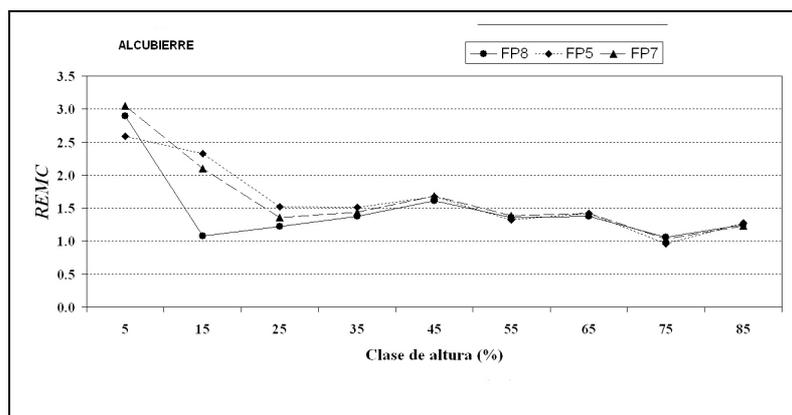


Figura 4.2. Tendencias de la raíz del error medio cuadrático (*REMC*) a lo largo del tronco, en intervalos de altura relativa de un 10%, para los modelos preseleccionados para la zona de Alcuibierre.

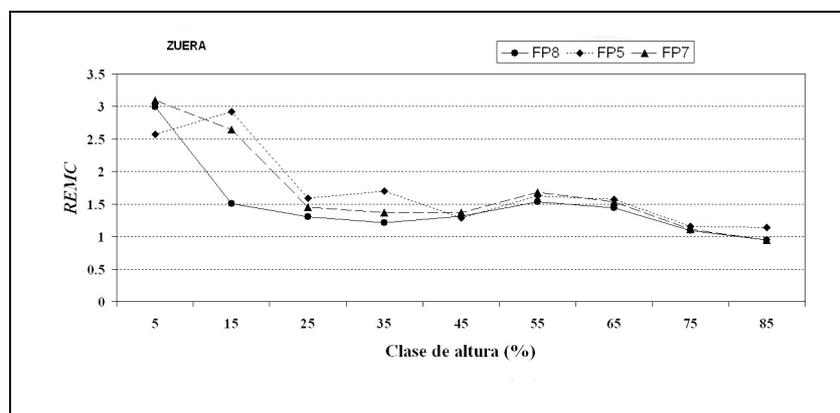


Figura 4.3. Tendencia de la raíz del error medio cuadrático (*REMC*) a lo largo del tronco, en intervalos de altura relativa de un 10%, para los modelos preseleccionados para la zona de Zuera.

Como se puede observar, en general, el comportamiento de los tres modelos en la tendencia de la raíz del error medio cuadrático es bastante similar a partir del primer 20% del fuste, sin embargo en el primer décimo el valor es un poco menor para el FP5 pero después en el segundo décimo el valor desciende bruscamente para el FP8, mientras que para los otros dos modelos se mantiene elevado. Estas tendencias del error medio cuadrático se muestran tanto para el conjunto total de datos como para cada una de las zonas independientemente.

Finalmente, de entre los tres modelos preseleccionados se ha optado por elegir el modelo FP8. Esta elección se han basado en que el modelo FP8 no ha presentado parámetros no significativos, ha mostrado mejores valores de los estadísticos en todos los casos, y en su

conjunto la tendencia del *REMC* también tiene mejor comportamiento que los otros dos modelos.

Para comprobar la validez del modelo propuesto, FP8, ha sido necesario visualizar el gráfico que enfrenta los valores observados con los valores predichos por el modelo. Sobre dicho gráfico se ha dibujado la diagonal (en línea discontinua) y la recta de regresión $Valores\ observados = a + b \cdot Valores\ predichos$ (en línea continua), así como su R^2 . Este tipo de gráficos permite verificar de una forma rápida el cumplimiento de la mayoría de las hipótesis estructurales del análisis de regresión, además de servir para detectar la existencia de sesgos o tendencias sistemáticas en los residuos, que causarían malas estimaciones de los modelos. Dichos gráficos se presentan en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

Puede observarse que en todos los casos el valor de los residuos se concentra entre un valor de ± 2 centímetros (algo mayor para el conjunto total de datos, ± 3) y que no existen tendencias significativas del valor del residuo frente al valor del diámetro predicho.

Por otra parte, junto con los gráficos de la raíz del error medio cuadrático (Figuras 4.1 a 4.3) se observa una tendencia a subestimar los valores del diámetro en las secciones más próximas a la base del árbol (del 20% al 40% del fuste, sobre todo para la zona de Zuera y en mucha menor medida para la de Alcubierre).

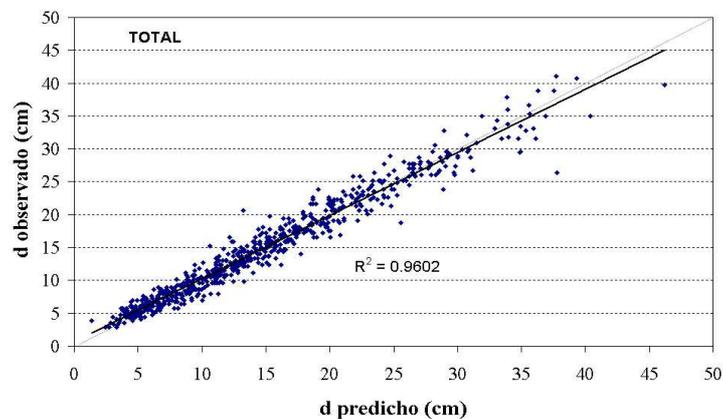


Figura 4.4. Gráfico de valores observados frente a valores predichos del diámetro para el modelo FP8 (Riemer *et al.*, 1995) en la fase de ajuste para el total de los datos.

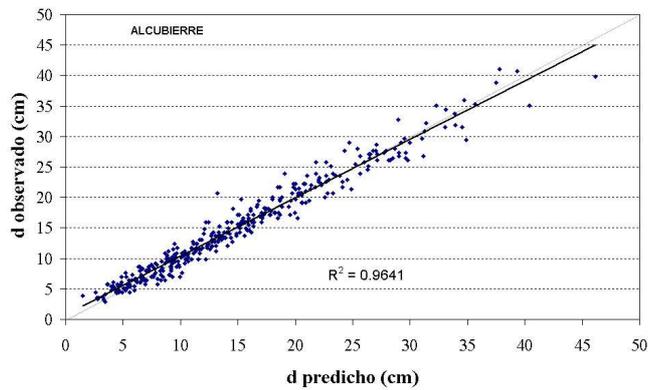


Figura 4.5. Gráfico de valores observados frente a valores predichos del diámetro para el modelo FP8 (Riemer *et al.*, 1995) en la fase de ajuste para Alcuibierre.

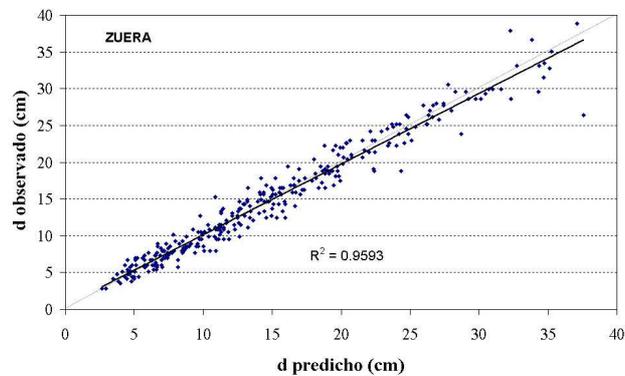


Figura 4.6. Gráfico de valores observados frente a valores predichos del diámetro para el modelo FP8 (Riemer *et al.*, 1995) en la fase de ajuste para Zuera.

Este modelo, como se ha comentado en párrafos anteriores, ha sido también seleccionado para otras especies españolas, por Castedo *et al.* (2005) para *Pinus radiata*, y por Novo *et al.* (2001, 2003) para *Pinus sylvestris*, en ambos casos para Galicia.

En resumen, de los 16 modelos analizados los que han presentado mejores valores de los estadísticos de comparación han sido los modelos del grupo 4, tanto para el conjunto total de datos como para cada una de las zonas independientemente. Sin embargo, estos modelos han presentado, en general, problemas de multicolinealidad e incluso algunos parámetros no significativos. Finalmente el modelo seleccionado para representar la función de perfil, tanto para el conjunto total de los datos como para cada uno de los montes de forma separada, ha sido el modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995), cuya expresión es la siguiente:

$$r_i = \frac{a_1 \cdot d}{1 - e^{a_3 \cdot (1,3-h)}} + \left(\frac{d}{2} - a_1 \cdot d \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 - e^{a_2 \cdot (1,3-h)}} \right) + e^{-a_2 \cdot h_i} \cdot \left[\frac{\left(\frac{d}{2} - a_1 \cdot d \right) \cdot e^{1,3 \cdot a_2}}{1 - e^{a_2 \cdot (1,3-h)}} \right] - e^{a_3 \cdot h_i} \cdot \left(\frac{a_1 \cdot d \cdot e^{-a_3 \cdot h}}{1 - e^{a_3 \cdot (1,3-h)}} \right) \quad (\text{ec.4.1})$$

siendo:

r_i : radio con corteza correspondiente a la altura h_i (cm).

d_i : diámetro con corteza correspondiente a la altura h_i (cm).

d : diámetro normal con corteza (cm).

h_i : altura (m) desde la base del árbol hasta el punto donde se alcanza el diámetro d_i .

h : altura total del árbol (m).

a_i : coeficientes a determinar mediante los ajustes de regresión.

Los valores de a_1 , a_2 y a_3 son los expresados en la Tabla 4.9, variando según se trate del conjunto total de datos o de cada uno de los montes por separado.

Tabla 4.9.- Parámetros ajustados para el modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995).

Parámetros	TOTAL	ALCUBIERRE	ZUERA
a_1	0,4893	0,4876	0,5000
a_2	1,9362	1,8401	7,8830
a_3	0,0559	0,0625	0,0339

En la Figura 4.7 se ha representado la función de perfil del modelo seleccionado, para un caso particular de la zona de Alcubierre.

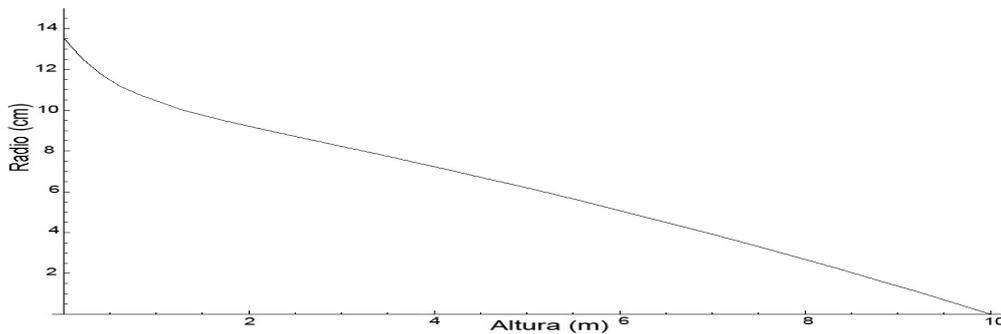


Figura 4.7. Modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995) para el caso particular de la zona de Alcubierre.

4.3.2. Construcción de la tarifa de cubicación con clasificación de productos

La tarifa de cubicación con clasificación de productos se obtiene a partir de la ecuación (ec.4.1), con los valores de los parámetros de la Tabla 4.9, según se trate del conjunto total de datos o de cada una de las zonas independientemente.

El volumen se obtiene integrando la ecuación (ec.4.1) alrededor del eje de alturas, de acuerdo con la expresión siguiente:

$$F(h_i) = \int \pi \cdot r_i^2(h_i) \cdot dh \quad (\text{ec.4.2})$$

En este caso es necesario realizar la integral definida entre cero y el valor de h, ya que la función de Riemer *et al.* (1995) (ec.4.1) corta el eje de coordenadas, obteniéndose valores negativos de volumen si se realiza la integral indefinida. Así, las expresiones que resultan para calcular el volumen total del árbol, integrando la expresión (ec.4.2) entre cero y H, son las ecuaciones (ec.4.3), (ec.4.4) y (ec.4.5), según se considere el conjunto total de datos o cada uno de los montes por separado, que aparecen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Ecuaciones para obtener el volumen total del árbol mediante su integración entre 0 y H.

	Expresión para obtener el volumen entre 0 y H	
TOTAL	$V = d^2 \cdot e^{-17,8167 \cdot H} \cdot \frac{(A - B + C + D + E + F + G + I + J)}{(1,07532 - e^{0,0559 \cdot h})^2 \cdot (12,3919 - e^{1,9362 \cdot h})^2}$	(ec.4.3)
ALCUBIERRE	$V = d^2 \cdot e^{-16,9987 \cdot H} \cdot \frac{(A - B + C + D + E + F + G + I + J)}{(1,08468 - e^{0,0625 \cdot h})^2 \cdot (10,937 - e^{1,8401 \cdot h})^2}$	(ec.4.4)

ZUERA	$V = d^2 \cdot e^{-71,1841 \cdot H} \cdot \frac{(A - B + C + D + E + F + G + I + J)}{(1,0451 - e^{0,0339 \cdot h})^2 \cdot (28,221,5 - e^{7,8830 \cdot h})^2}$	(ec.4.5)
-------	--	----------

donde las expresiones de A, B, C, D, E, F, G, I y J se muestran en la Tabla 4.11, según se trate del conjunto total de datos o de cada uno de los montes de forma independiente.

Tabla 4.11. Expresiones de A, B, C, D, E, F, G, I y J para el conjunto total de datos y cada una de las zonas por separado

TOTAL
$A = 171,747 \cdot e^{19,7528 \cdot h}$
$B = 6,48127 \cdot e^{21,689 \cdot h}$
$C = 26,4515 \cdot e^{21,7449 \cdot h}$
$D = e^{19,8646 \cdot h} \cdot (505,168 - 19,0471 \cdot h)$
$E = e^{17,8725 \cdot h} \cdot (4,323,16 - 5,56932 \cdot h)$
$F = e^{17,8167 \cdot h} \cdot (-1,131,23 + 0,0642955 \cdot h)$
$G = e^{19,8087 \cdot h} \cdot (-676,921 + 0,439783 \cdot h)$
$I = e^{21,8007 \cdot h} \cdot (-19,9697 + 0,752032 \cdot h)$
$J = e^{17,9284 \cdot h} \cdot (-3,191,92 + 120,604 \cdot h)$
ALCUBIERRE
$A = 135,019 \cdot e^{18,8388 \cdot h}$
$B = 5,70286 \cdot e^{20,679 \cdot h}$
$C = 23,3846 \cdot e^{20,7415 \cdot h}$
$D = e^{18,9639 \cdot h} \cdot (396,124 - 16,7552 \cdot h)$
$E = e^{17,0613 \cdot h} \cdot (3,009,31 - 5,03685 \cdot h)$
$F = e^{16,9987 \cdot h} \cdot (-793,089 + 0,0675109 \cdot h)$
$G = e^{18,9014 \cdot h} \cdot (-531,151 + 0,449153 \cdot h)$
$I = e^{20,804 \cdot h} \cdot (-17,681 + 0,747057 \cdot h)$
$J = e^{17,1238 \cdot h} \cdot (-2,216,21 + 93,9474 \cdot h)$
ZUERA
$A = 649,168 \cdot e^{79,0671 \cdot h}$
$B = 11,4049 \cdot e^{86,95 \cdot h}$
$C = 45,9618 \cdot e^{86,984 \cdot h}$
$D = e^{79,135 \cdot h} \cdot (1,95562 \cdot 10^6 - 44,329,2 \cdot h)$
$E = e^{71,2181 \cdot h} \cdot (3,68666 \cdot 10^{10} - 31,379,9 \cdot h)$
$F = e^{71,1841 \cdot h} \cdot (-9,21713 \cdot 10^9 + 0,393543 \cdot h)$
$G = e^{87,0179 \cdot h} \cdot (-34,5568 + 0,78536 \cdot h)$

$I = e^{79,101 \cdot h} \cdot (-2,60479 \cdot 10^6 + 1,11189 \cdot h)$
$J = e^{71,252 \cdot h} \cdot (-2,76495 \cdot 10^{10} + 6,25534 \cdot 10^8 \cdot h)$

Se puede obtener el volumen del árbol (V) entre dos alturas h_1 y h_2 a partir de las ecuaciones (ec.4.3 a ec.4.5, según zonas) mediante la expresión $V = F(h_2) - F(h_1)$. Sin embargo, este método presenta el inconveniente de que la ecuación de Riemer *et al.* (1995) no tiene inversa generalizada, por lo que no puede estimarse directamente el volumen hasta un cierto diámetro en punta delgada. Resulta necesario, entonces, utilizar procedimientos iterativos de determinación de raíces para estimar la altura a la que se alcanza un determinado diámetro en punta delgada (Castedo y Álvarez, 2000; Novo *et al.*, 2003). A este respecto, Novo *et al.* (2003) han desarrollado un programa en lenguaje SAS que estima la altura a la que se alcanza un determinado diámetro mediante el método de estimación de raíces de la bisección, permitiendo así la construcción de una tabla de cubicación que da el volumen del árbol para diferentes combinaciones de diámetro normal, altura total y radio en punta delgada.

En la Figura 4.8. se ha representado un ejemplo del fuste entero de un árbol teórico basado en la curva obtenida mediante la integración de la función de perfil del modelo de Riemer *et al.* (1995), para el caso particular de un árbol de la zona de Alcubierre. Con este modelo se puede representar tanto el árbol completo como cualquier tramo del fuste (en la figura aparece sin tocón ni rabeón).

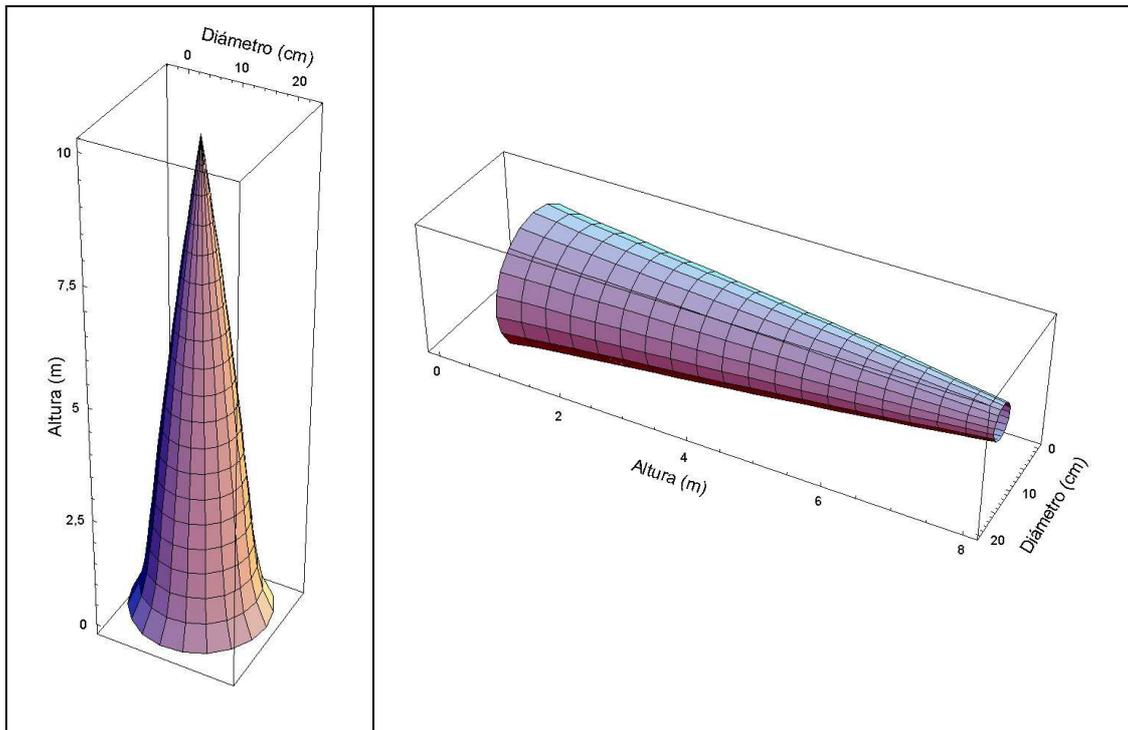


Figura 4.8. Representación teórica de fuste entero y del fuste sin tocón ni raberón para el caso particular de un árbol de la zona de Alcubierre.

4.3.3. Comparación entre zonas

Para determinar si realmente los dos modelos son distintos en sus parámetros se usó el test de la F , tal y como se explica en el capítulo de Introducción. El valor obtenido para la F fue de 2,97, con estructura continua autorregresiva del error, y de 1,69 sin ella. El $F_{crítico}(1-\alpha; df_R - df_C; df_C) = 2,60$ a un nivel de confianza $\alpha = 0,05$. El primer valor es mayor que el $F_{crítico}$, lo que sugiere que la función de perfil para cada zona es diferente, aunque por muy escaso margen. Sin embargo, el segundo es menor, lo que indica que no hay diferencias para la función de perfil en las dos zonas. Dado que en la práctica el modelo se emplea sin estructura continua del error, parece más lógico utilizar el segundo resultado.

Como se puede observar en la Tabla 4.12, los valores obtenidos del Δ_{REMC} cuando se aplica el modelo correcta e incorrectamente oscilaron entre el 0,1 y el 6,65%. Los valores más bajos resultaron al aplicar el modelo combinado a cada una de las dos zonas, y fueron inferiores al 0,5%, lo que sugiere que se puede emplear este modelo para ambas zonas. Sin

embargo, el mayor valor se produjo al utilizar el modelo de Zuera a los datos de Alcubierre, un valor alto que indica que no es aconsejable esta mezcla de ecuaciones.

Tabla 4.12. Valores de $REMC$ e Δ_{REMC} (%), como consecuencia de mezclar las ecuaciones, en términos de la predicción obtenida.

Ecuación	$REMC_c$	$REMC_e$	Δ_{REMC} (%)
Combinada aplicada a Alcubierre	1,6786	1,6803	0,1013
Combinada aplicada a Zuera	2,0954	2,1049	0,4559
Alcubierre aplicada a Zuera	2,0954	2,1092	0,6593
Zuera aplicada a Alcubierre	1,6786	1,7903	6,6542

4.4. Conclusiones

De los 16 modelos analizados, finalmente el modelo seleccionado para representar la función de perfil, tanto para el conjunto total de los datos como para cada uno de los montes de forma separada, ha sido el modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995), cuya expresión es la indicada en la ecuación (ec.4.1)

De los resultados del Test de la F y de los valores obtenidos del Δ_{REMC} (%), al utilizar las ecuaciones correcta e incorrectamente en cada una de las zonas, y desde el punto de vista práctico, se recomienda emplear la función de perfil combinada para ambas zonas.

La expresión de dicho modelo es la de la ecuación (ec.4.1), con los valores de los parámetros a_1, a_2 y a_3 expresados para el TOTAL en la Tabla 4.9, y la expresión para obtener el volumen entre 0 y H es la indicada en la ecuación (ec.4.3), con los valores expresados en la Tabla 4.11.

4.5. Bibliografía

- Alía, R., Martín, S., Agúndez, D. y Gómez Garay, A. (2000) La mejora genética del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales 10, 19-27.
- Álvarez González, J.G., Ruíz González, A.D., Barrio Anta, M. (2004). Modelos paramétricos de la matriz de varianzas-covarianzas en el ajuste de funciones de perfil. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 18, 297-302.
- Badía, M., Rodríguez, F. y Broto, M. (2001) Modelos del perfil del árbol. Aplicación al pino radiata (*Pinus radiata* D. Don.). III Congreso Forestal Español, Granada.
- Barrio, M. (2003) Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, p. 252.
- Barrio Anta, M., Diéguez-Aranda, U., Castedo Dorado, F., Álvarez González, J.G. y Gadow, K.v. (2007). Merchantable volume system for pedunculate oak in northwestern Spain. *Annals of Forest Science* 64, 511-520.
- Bates, D.M. y Watts, D.G. (1988) *Nonlinear regression analysis and its applications*, John Wiley & Sons, New York.
- Benko, M., Novotny, V., Szivovicza, L., Bezak, K. y Vrbek, B. (1997) Volume tables for Aleppo pine (*Pinus halepensis*). Radovi Sumarski Institut Jastrebarsko. 1997, Special edition N°. 6, viii + 138 p.
- Benko, M., Szivovicza, L. y Novotny, V. (1995) Some structural elements of Aleppo pine. *Radovi Sumarski Institut Jastrebarsko*, 30(1), 75-87.
- Bennett, F.A. y Swindel, B.F. (1972) Tapes curves for planted slash pine. *USDA Forest Service Research Note*, 179, 4.
- Bi, H. (2000) Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalypts. *Forest Science*, 46(3), 397-409.
- Biging, G.S. (1984) Taper equations for second growth mixed conifers of northern California. *Forest Science*, 30, 1.103-1.117.
- Burkhart, H.E. (1977) Cubicfoot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *South. J. Appl. For.*, 1(2), 7-9.
- Burkhart, H.E. y Walton, S.B. (1985) Incorporating crown ratio into taper equations for loblolly pine trees. *Forest Science*, 31, 478-484.
- Cao, Q.V., Burkhart, H.E. y Max, T.A. (1980) Evaluation of two methods for cubic-foot volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science*, 26, 71-80.

- Castedo, F. (2004) Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* Don. en Galicia. Simulación de alternativas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- Castedo, F. y Álvarez, J.G. (2000) Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 9(2), 253-268.
- Castedo F., Barrio M., Parresol B.R. y Álvarez, J.G. (2005) A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). *Annals of Forest Science* 62, 455-465.
- Castellani, C., Ghidini, G. y Tosi, V. (1980) Volume and yield tables for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in Italy. *Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura* 8, 3-44.
- Cervera, J.M. (1973) El área basimétrica reducida, el volumen reducido y el perfil. *Montes*, 415-418.
- Couhert, B. y Duplat, P. (1993) Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in the Provence-Alpes-Cote d'Azur region: proposals for silviculture and a yield model. *Bulletin Technique Office National des Forets*(25), 3-22.
- Daquitaine, R., Saint-André, L. y Leban, J.M. (1999) Modelling stem properties distribution. Final report of Subtask A2.1 Stud Research Project, FAIR CT-96-1915 (Leban, J.M. & Hervé, J.C., Ed.), p. 3-23. Documento interno INRA-ERQB.
- Davidian, M. y Giltinan, D.M. (1995) *Nonlinear models for repeated measurement data*. Chapman and Hall, London.
- Demaerschalk, J. (1972) Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3), 241-245.
- . (1973) Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. *Canadian Journal of Forest Research*, 3(1), 90-94.
- Diéguez-Aranda, U. (2004). Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Diéguez-Aranda U., Castedo-Dorado F., Álvarez-González J.G., Rojo A. (2006), Compatible taper function for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in northwestern Spain. *Canadian Journal of Forest Research* 36 1190-1205
- Diggle, P.J., Heagerty, P.J., Liang, K.Y. y Zeger, S.L. (2002) *Analysis of longitudinal data*. Oxford University Press.
- Draper, N.R. y Smith, H. (1998) *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons.

- Forslund, R. (1990) The power function as a simple stem profile examination tool. *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 193-198.
- Gadow, K.v., Real, P. y Álvarez González, J.G. (2001) Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. IUFRO World Series, Vol. 12. Vienna.
- Garber, S.M. y Maguire, D.A. (2003) Modelling stem taper of three central Oregon species using mixed effects models and autoregressive error structures. *Forest Ecology Management*, 179, 507-522.
- García Esteban, L. y de Palacios, P. (2000) La madera del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). *Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales*, 10, 51-55.
- Gregorie, T.G., Schabenberger, O. y Barret, J.P. (1995) Linear modelling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 137-156.
- Hartley, H.O. (1961) The modified Gauss-Newton method for the fitting of nonlinear regression functions by least squares. *Technometrics*, 3, 269-280.
- Hui, G., y Gadow, K. (1997) Entwicklung und Erprobung eines Einheitsschaftmodells für die Baumart *Cunninghmya lanceolata*. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 116, 315-321.
- Kozak, A. (1988) A variable-exponent taper equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 1.363-1.368.
- . (1997) Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variables exponent taper functions. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 619-629.
- Kozak, A., Munrod, D. y Smith, J. (1969) Taper functions and their application in forest inventory. *Forestry Chronicle*, 45(4), 278-283.
- Krstanov, K. y Belyakov, P. (1988) Growth tables for *Pinus halepensis* in the Uarsenis massif, Algeria. *Gorsko Stopanstvo*, 44(7), 28-30.
- Laasasenaho, J. (1982) Taper curve and volume functions for pine, spruce, and birch. *Commun. Inst. For. Fenn.*, 108.
- Linnell, A. (1996) Analysis of repeated measures and time series. An introduction with forestry examples. Working paper. British Columbia Ministry of Forests.
- Martinez Millan, F.J., Ara Lazaro, P. y González Doncel, I. (1992) Tablas de cubicación de tres entradas para su uso en la ordenación de montes. *Investigacion Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 1(1), 95-102.
- Martinez Millán, F.J., Ara Lázaro, P. y González Doncel, I. (1993) Ecuaciones alométricas de tres variables: estimación del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables españolas. *Investigacion Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 2(2), 211-228.

- Muhairwe, C.K. (1994) Tree form and taper variation over time for interior logepole pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1.904-1.913.
- . (1999) Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. *Forest Ecology and Management*, 113, 251-269.
- Newnham, R. (1988) A variable-form taper function. *Forest Canada*. Petawawa National Forestry Institute. Inf. Rep. PI-X-83, 1-33.
- . (1990) Mesure du defilement de forme variable. *Fôrets Canada*, p. 31. Institut Forestier National de Petawawa. Rapport d'information PI-X-83-F.
- . (1992) Variable-form taper functions for four Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 210-223.
- Novo, N., Castedo, F., Álvarez González, J.G. y Rojo, A. (2001) Funciones de perfil del tronco para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. III Congreso Forestal Español, Mesa 4, p. 356-362, Granada.
- Novo, N., Rojo, A. y Álvarez, J.G. (2003) Funciones de perfil del tronco y tarifas de cubicación con clasificación de productos para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. *Inv. Agr.: Sist. Recur. For.*, 12(1), 123-136.
- Novotny, V. (1990) Preliminary two-entry tables for Aleppo pine and their comparison with Italian two-entry tables for Aleppo pine. *Radovi Sumarski Institut Jastrebarsko*, 25(2), 441-460.
- Nuñez-Antón, V. y Zimmerman, D.L. (2001) Modelización de datos longitudinales con estructuras de covarianza no estacionarias: modelos de coeficientes aleatorios frente a modelos alternativos. *Qüestió*, 25(2), 225-262.
- Parresol, B.R. y Vissage, J.S. (1998) White Pine Site Index for the Southern Forest Survey. Res. Pap. SRS-10. Asheville, NC:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 8 p.
- Peña, D. (2002) Regresión y diseño de experimentos. Alianza Editorial.
- Pérez, D., Burkhart, H.E. y Stiff, C. (1990) A variable form taper function for *Pinus oocarpa* Schiede in Central Honduras. *Forest Science*, 36, 186-191.
- Pinheiro, J.C. y Bates, D.M. (2000) *Mixed models in S and S-PLUS*. Springer, New York.
- Riemer, T., Gadow, K.v. y Sloboda, V.B. (1995) Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. *Allg. Forst-und J.- Ztg.*, 166(7), 144-147.
- Roda, J.M. (2001) Form function for the "I-214" poplar merchantable stem (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv cultivar "I-214"). *Annal of Forest Science*, 58, 77-87.

- Rodríguez, F. y Blanco, R. (2001) Tarifa de cubicación con clasificación de productos para chopo I-214 del valle medio del Cinca (Huesca). Actas del III Congreso Forestal Nacional, Tomo 4-5, p. 321-326, Granada, 3-5 septiembre.
- Rodríguez, F., Broto, M. y Leban, J.M. (2003) Equations de profil des tiges chez le pin radiata (*Pinus radiata* D. Don) du Pays Basque (Espagne). Annals of Forest Science.
- Rodríguez, F. y Molina, C. (2003) Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de la cilindricidad para tres clones de chopo (*Populus x euroamericana*) en Navarra. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 12 (3), 73-85.
- Rondeux, J. (1993) La mesure des arbres et des peuplements. Les Presse Agronomiques de gembloux.
- SAS. (2001) INSTITUTE INC. SAS/STAT™ User's Guide. Release 8.2. Cary, N.C. USA.
- Tassisa, G. y Burkhart, H.E. (1998) An application of mixed effects analysis to modelling thinnings effects on stem profile of loblolly pine. Forest Ecology and Management, 103, 87-101.
- Trincado, G., Gadow, K.v. y Sandoval, V. (1997) Estimación de volumen comercial en latifoliadas. Bosque, 18 (1), 39-44. Chile.
- Verbeke, G. y Molenberghs, G. (2000) Linear mixed models for longitudinal data. Springer series in statistics. Springer-Verlag, New York.
- West, P.W. (1995) Application of regression analysis to inventory data with measurements on successive occasions. Forest Ecology and Management, 71, 227-234.
- Zimmerman, D.L. y Nuñez-Antón, V. (2001) Parametric modelling of growth curve data: An overview. Test, Vol, 10 (1).

Capítulo 5.- CALIDAD DE ESTACIÓN

5.1. Introducción

Uno de los aspectos más importantes para la gestión de una masa forestal de una especie determinada es el conocimiento de su potencialidad productiva, fundamentalmente en productos maderables, así como de la selvicultura necesaria para conseguirla al final del ciclo productivo. Para ello es necesario determinar la calidad que presenta una estación o área determinada para esa especie en particular.

El concepto de calidad de estación forestal se refiere a la capacidad de ese sitio o estación para permitir el crecimiento de los árboles que sustenta, de acuerdo con sus características climáticas, edáficas y biológicas. Esta calidad debe ser definida para una especie concreta y en una zona ecológicamente homogénea, y es una manera de evaluar la potencialidad de la zona para producir madera. Idealmente la calidad de estación debería ser medida directamente como la producción total al final del ciclo productivo, pero dada la longitud del mismo en las especies forestales, fundamentalmente en las de crecimiento lento, es necesario recurrir a métodos de estimación.

Debido a esto, la calidad de estación debe ser estimada indirectamente a través de atributos estacionales. Estos atributos o factores pueden ser (Ortega y Montero, 1988):

- Factores intrínsecos a la masa forestal:
 - Estimación por la historia de la producción (volumen total al final del turno).
 - Estimación basada en datos de crecimiento medio máximo de la masa.
 - Estimación basada en datos de altura de la masa.

- Factores extrínsecos a la masa forestal:
 - Estimación por los factores de la biocenosis (especies indicadoras o asociaciones indicadoras).
 - Estimación por los factores del biotopo (topográficos, climáticos y edáficos).

Tal y como explica Barrio (2003), son los factores intrínsecos los que mejores resultados han aportado en la estimación de la calidad de estación, y entre ellos es la altura dominante la variable dasométrica que ha sido más utilizada. Las razones para el empleo de la altura dominante son las siguientes:

- Es fácil de determinar en campo.
- Posee una buena correlación con la producción volumétrica.
- Indica la calidad de estación para todas las edades de la población.
- Es relativamente independiente de la densidad de la población (salvo para valores extremos) y de los tratamientos selvícolas que se apliquen.

Aunque la altura dominante no es totalmente independiente de la densidad (Monserud, 1988; Smith y Strub, 1991) se asume, particularmente para las coníferas, que el crecimiento en altura dominante es relativamente independiente del espaciamiento y la competencia durante el ciclo productivo de la masa (Evert, 1971). Según Buford y Mackee (1988) la altura dominante es un buen indicador de la calidad de estación, ya que el crecimiento en altura de los árboles es un proceso dinámico, y variaciones en las características del suelo o en otras condiciones ambientales acarrear variaciones en el crecimiento en altura durante la vida de los árboles, por lo que la altura dominante es una medida del resultado acumulativo de todas estas condiciones de crecimiento a una determinada edad.

Erviti (1991) también defiende la utilidad de usar la relación entre la altura dominante y la edad como medida de la calidad de estación, aunque considera que esta relación es un mero aspecto parcial y que con las herramientas de cálculo existentes actualmente podrían tenerse en cuenta más aspectos del crecimiento en una estación que únicamente la altura dominante.

También insisten Erviti (1991) y Barrio (2003) en la ventaja que supone la existencia de una estrecha correlación entre la altura dominante y la producción total en volumen (expresión de la ley de Eichhorn), que permite transformar la predicción de la primera a una producción total en volumen para el conjunto de la masa, de tal forma que el establecimiento de la capacidad productiva o calidad de estación en función de la altura dominante tiene entonces una doble utilidad práctica: como herramienta para estimar la producción y como base para construir instrumentos prácticos de gestión de masas forestales.

Dadas las numerosas definiciones de altura dominante se ha optado por usar una definición derivada de Assmann (1970), que considera la altura dominante como la media de las alturas de los cien árboles más gruesos por hectárea. Esta definición, además de ser simple, es la más habitualmente utilizada y permite realizar comparaciones con las curvas de calidad de *Pinus halepensis* elaboradas por otros autores como Erviti (1991) y Montero *et al.* (2000).

5.1.1. Curvas de calidad para *Pinus halepensis* en España

Como ya se ha comentado en el Capítulo 1. Introducción, a pesar de que la superficie de masas naturales de *Pinus halepensis* en España representa un 7% de la superficie forestal arbolada nacional (Herranz, 2000) y las repoblaciones con esta especie un 15% de las realizadas en el período 1940-1980 (calculado a partir de los datos de Abelló, 1988), el pino carrasco no es una especie especialmente productiva comparada con otros pinos. Debido a ello, no se le ha dedicado la debida atención desde este punto de vista, aunque, como ya se ha manifestado, a escala local puede ser la única alternativa para la producción de madera. Así, en España sólo se han elaborado las curvas de calidad de Pita (1965), Erviti (1991) y Montero *et al.* (2000), todas ellas para masas sin distinguir su procedencia: regeneración natural o repoblación.

Como antecedentes en materia de productividad para *Pinus halepensis* están los trabajos de Martín (1947), que aunque no llegó a establecer calidades de estación, sí cuantificó cuatro casos concretos de productividad en repoblaciones coetáneas.

Pita (1965) utilizó un caso particular de la ecuación de Hossfeld para obtener curvas anamórficas de altura media-edad para pino carrasco, estableciendo cuatro calidades (alturas dominantes de 4, 7, 10 y 13 metros a los 40 años). Sin embargo, Erviti (1991), aunque reconoció su utilidad, desaconsejó su uso por entender que es posible encontrar funciones polimórficas más flexibles (con un patrón de crecimiento distinto para cada calidad). Además, utilizó la altura media, que después tradujo a altura dominante mediante una relación lineal obtenida por regresión. Esto hace difícil llevar a cabo una comparación objetiva de estas curvas con las curvas elaboradas por otros autores.

Erviti (1991) obtuvo las curvas de calidad para el este y sureste de la Península Ibérica utilizando los datos de la red de parcelas permanentes de investigación que estableció el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, actual CIFOR-INIA (Pita, 1965). Para ello utilizó el procedimiento diseñado por García (1979; 1980; 1983; 1984) usando la

función de Richards (1959) y estableció cinco clases de calidad de estación definidas por alturas dominantes de 14, 12, 10, 8 y 6 metros a los 40 años de edad. El rango de edades para el que consideraba aceptable la aplicación del modelo va de 25 a 75 años.

Gómez *et al.* (1997) han aplicado las curvas de Erviti a grupos de parcelas concretas de la red de parcelas permanentes del CIFOR-INIA. Uno de estos grupos, formado por cuatro parcelas, corresponde a las provincias de Zaragoza y Teruel. Además dicho grupo incluye una parcela localizada en uno de los montes de estudio en esta tesis (zona de Zuera). De acuerdo con estos autores, los crecimientos en altura dominante en este monte oscilarían entre 0,15 y 0,21 m/año, concluyendo que este grupo, además de ser una clase productiva diferenciada, también es un grupo fitoclimático distinto, incluyéndolo dentro del nemoromediterráneo subesclerófilo.

Montero *et al.* (2000), utilizando la misma red de parcelas ya comentada, pero con los datos recopilados en seis inventarios (medidos entre 1965 a 1999), han elaborado un modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus halepensis* en España empleando la ecuación de Bertalanffy-Richards (Bertalanffy, 1949; Bertalanffy, 1957; Richards, 1959). A partir de este modelo, dichos autores han establecido cuatro curvas de calidad para la especie, definidas por alturas dominantes de 20, 17, 14 y 11 metros a los 80 años de edad. Para cada una de estas calidades elaboraron tablas de producción de selvicultura variable, con un régimen moderado de claras para las calidades 14 y 17.

5.1.2. Curvas de calidad para *Pinus halepensis* en otros países

Erviti (1991) hace un repaso de los trabajos existentes sobre productividad de la especie en las costas europea y africana del Mediterráneo, comparando las experiencias de Martín (1947) en España, Castellani *et al.* (1980/82) en Italia, Pardé (1957) y Abbas *et al.* (1985a; 1985b) en Francia, Panetsos (1981) en Grecia, Souleres (1975) en Túnez y Gualdi (1979) y Franz y Forster (1980) en Argelia. Montero *et al.* (2001) también comparan sus curvas, además de con las otras españolas, con las de otros autores como Pardé (1957), Castellani *et al.* (1980/82), Röhle (1992) y Couhert y Duplant (1993).

A continuación se comentan algunos de los trabajos más recientes sobre calidad de estación en *Pinus halepensis*:

Franz y Forster (1980) determinaron las clases de calidad a una edad de referencia de 100 años, agrupándolas en clases de alturas de 1 metro entre la mejor calidad (20 metros) y la peor (8 metros). Las tablas de producción de estos últimos autores han sido las más utilizadas en España hasta la publicación de las de Montero *et al.* (2000), e incluso han sido recomendadas desde las Universidades (Madrigal *et al.*, 1999), debido a la entonces ausencia de unas propias para las masas de la Península Ibérica.

Castellani *et al.* (1980-82) establecieron cinco clases de calidad para la especie en Italia para una edad de referencia de 40 años, alcanzando 20 metros de altura dominante en la primera calidad.

Abbas (1986) estableció mediante una metodología gráfica cinco clases de calidad en función de la altura dominante (20, 18, 16, 13 y 10 metros), para el Sudeste mediterráneo francés, integrándolas con cinco clases de fertilidad del suelo y seis clases de productividad de madera.

Röhle (1992) fijó para Israel diez calidades para *Pinus halepensis*, separadas por curvas que alcanzaban de 8 a 28 metros de altura dominante a una edad de referencia de 50 años.

Couhert y Duplant (1993) definieron ocho curvas de calidad para la región francesa de la Provenza-Alpes-Costa Brava, para una edad de referencia de 50 años y alturas dominantes de 4 a 18 metros.

Vennetier y Herve (1999) ajustaron un modelo de crecimiento en altura dominante para esta especie en la Provenza francesa, cubriendo un área de 500.000 ha, en las cuales se incluyen unas 100.000 ha de *Pinus halepensis* en masas puras o mixtas. Para ello utilizaron la función de Bertalanffy-Richards dejando el parámetro de la asíntota como parámetro específico del árbol. Para clasificar las masas según su productividad definieron cinco clases de calidad de estación delimitadas por las curvas que pasan por las alturas dominantes de 6,7; 10; 13,4; 16,7; 20,1 y 23,4 m a la edad de referencia de 70 años.

Más recientemente, Belghazi *et al.* (2000) elaboraron curvas de calidad para las masas naturales de *Pinus halepensis* de Marruecos, ubicadas en su mayor parte en la región del Alto Atlas. Dichos autores emplearon el modelo de Prodan (Prodan, 1968) para obtener curvas anamólicas. Concretamente establecieron tres clases de calidad, la clase 1 con altura dominante superior a 15 m, la clase 2 con altura dominante entre 13,1 y 15 m, y la clase 3

con una altura dominante inferior a 13 m, a la edad de referencia de 60 años. Las producciones medias varían entre 1,4 y 0,72 m³/ha año, para la mejor y peor calidad respectivamente.

5.2. Material y métodos

5.2.1. Datos empleados

Con los datos procedentes de los árboles seleccionados en el inventario, explicado en el capítulo de introducción, se ha realizado una comparación con las curvas de calidad tanto de Erviti (1991) como de Montero *et al.* (2000). Además, se han seleccionado nuevos árboles en las dos zonas de estudio para recoger la máxima variación de calidades posible. Para la elección de estos árboles se han tenido en cuenta una serie de requisitos que deben cumplir las masas para posibilitar el empleo del índice de sitio como indicador de la calidad de estación (Girardin y Broquen, 1995):

- Las masas no deben encontrarse en un estado juvenil de crecimiento, debido a que en esta fase el crecimiento es muy variable y puede estar afectado por otros factores distintos a los de la estación.
- Las densidades no deben ser extremas, de forma que no afecten al desarrollo de la altura dominante.
- No se deben haber realizado tratamientos selvícolas que hayan afectado al estrato dominante.
- El estado sanitario general debe ser bueno y los árboles dominantes no deben presentar daños.

Existen tres métodos de recogida de datos para la construcción de las curvas de calidad de estación (Clutter *et al.*, 1983):

- a) Medición de la edad y la altura dominante de la masa en parcelas temporales.
- b) Medición de la edad y la altura dominante de la masa a lo largo del tiempo en parcelas permanentes.
- c) Reconstrucción de los patrones de desarrollo de la altura con la edad para árboles dominantes a través de técnicas de análisis de tronco.

El último método ha sido el empleado en este trabajo, ya que proporciona datos de tanta calidad como aquellos procedentes de las remediciones, y aunque es caro, permite obtener éstos de forma inmediata. Por otra parte, los árboles utilizados para el análisis de tronco pueden ser también empleados para el desarrollo de ecuaciones que permitan la estimación del volumen o la biomasa de los árboles.

Como se ha explicado en el capítulo 1, se apearon un total de 111 árboles distribuidos por toda la masa de estudio (aproximadamente la mitad en cada una de las dos grandes zonas), 96 de ellos representativos de las diferentes clases diamétricas existentes y en la misma proporción, con objeto de utilizarlos en el ajuste de funciones de perfil. De estos árboles apeados 39 fueron dominantes y se ampliaron con la corta de otros 15, de tal forma que el conjunto total de la muestra dominante (54) estuviera repartido entre las diferentes calidades, según la comparación realizada con las curvas de Erviti (1991) y Montero *et al.* (2000).

Dado el reducido número de árboles de la muestra, así como los resultados obtenidos en los Capítulos anteriores, que han mostrado que no había diferencias significativas entre las dos zonas de estudio que aconsejaron el empleo de modelos diferentes para cada una de ellas, se ha optado en este capítulo por ajustar una única ecuación para toda la masa de estudio.

En cada uno de los árboles seleccionados se midió el perímetro a 1,30 metros de altura (tal y como se había realizado en el inventario con el fin de homogeneizar la toma de datos) y posteriormente se procedió al apeo y medición de la altura total y la altura del tocón. Cada árbol fue dividido en trozas de 1 metro de longitud. En cada troza se midió el perímetro (en cm) en cada una de las caras, así como el espesor de la corteza (en cruz, en mm) en las mismas y el número de anillos. Finalmente se estimaron los volúmenes totales con y sin corteza, cubicando cada troza por la fórmula de Smalian excepto el raberón, que se consideró como un cono.

En la Tabla 5.1 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables dendrométricas de la muestra de árboles empleados en el ajuste de las curvas de calidad de estación: h (altura total, en metros), d (diámetro normal, en centímetros), v_{cc} (volumen con corteza, en dm^3), v_{sc} (volumen sin corteza, en dm^3), relación h/d (altura/diámetro) y t (edad, en años).

Tabla 5.1. Valores de los estadísticos descriptivos de los árboles dominantes empleados en el ajuste de las curvas de calidad de estación.

Estadístico	h (m)	d (cm)	h/d (%)	v_{cc} (dm ³)	v_{sc} (dm ³)	t (años)
Mínimo	4,89	13,37	27	0,02	0,02	42
Máximo	16,03	47,75	49	1,05	0,83	117
Media	10,2	28,13	38	0,34	0,27	76,23
Desviación estándar	3,15	8,37	0,05	0,27	0,22	19,84
Coef. de variación %	30	30	14	78	82	26

Para eliminar el sesgo introducido por el análisis de tronco en la estimación de la edad real a la que se alcanza la altura de corte en el tronco (dado que no coincide la sección de corte con el crecimiento periódico en altura), se ha empleado el método de Carmean (1972) con la corrección propuesta por Newberry (1991) para la troza final.

En la Figura 5.1 se presentan las trayectorias de las alturas dominantes de cada uno de los árboles empleados en los ajustes frente al tiempo. Este tipo de gráficos en los que se presenta la evolución de la variable respuesta frente al tiempo, se denominan gráficos de perfil “*profile plots*” (Barrio, 2003) y son de gran ayuda para el diagnóstico de la estructura de la media de la población, ya que permiten detectar si la falta o escasez de datos en algunas zonas condiciona su comportamiento.

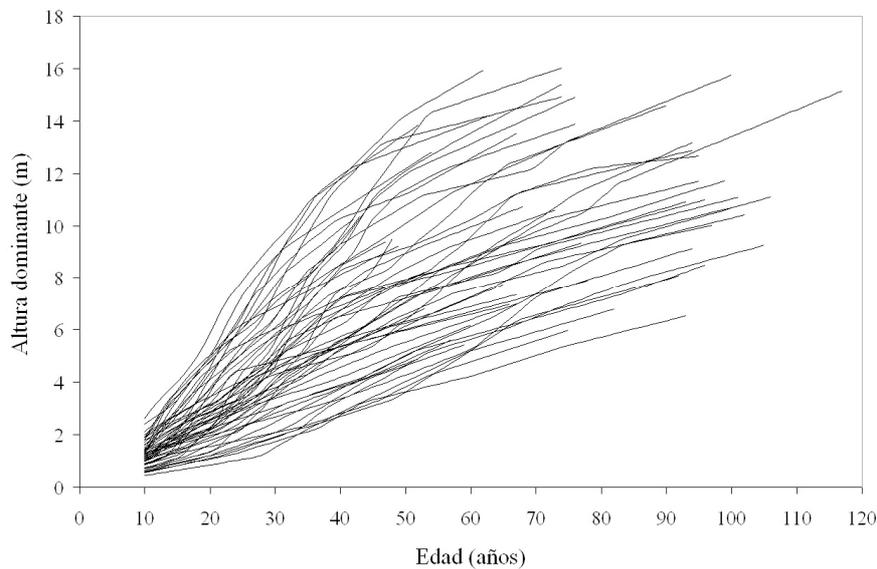


Figura 5.1. Gráficos de perfil de la altura de los 54 árboles dominantes empleados en el ajuste de los modelos de calidad de la estación. La altura dominante de cada árbol ha sido corregida con el algoritmo de Carmean (1972), y la corrección posterior de Newberry (1991).

En la Figura 5.2 se muestran los gráficos de perfil de la muestra junto con la curva correspondiente a los valores medios para cada edad. En esta línea media se observa una caída en escalón, aunque manteniéndose la tendencia, después de los 72 años, lo que responde a la escasez de datos en las edades superiores, y que es más acusada en las mejores calidades. Este problema es común en la construcción de curvas de calidad para las especies de turnos medios y largos, puesto que, normalmente, no se encuentran masas de las mejores calidades con edades avanzadas, lo que condiciona la adecuación de la familia de curvas generada a toda la nube de puntos.

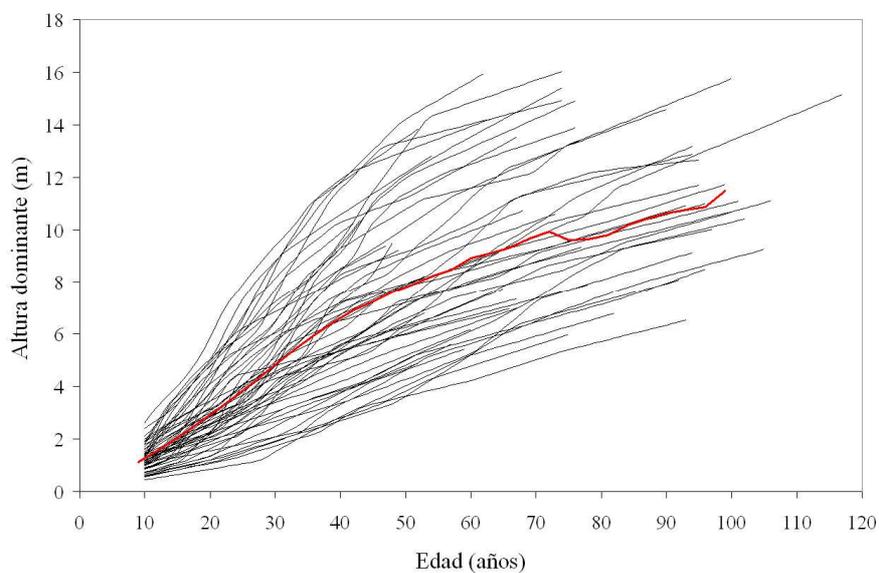


Figura 5.2. Gráficos de perfil de las alturas de los 54 árboles dominantes empleados en los ajustes de las curvas de calidad de la estación junto con la estructura de la media de los datos (línea roja).

5.2.2. Modelos analizados

5.2.2.1. Introducción

La relación entre la altura dominante y la edad, necesaria para la construcción de las curvas de crecimiento en altura, puede ser establecida mediante ecuaciones estáticas o dinámicas. Las primeras han sido las más empleadas, pero necesitan fijar una edad de referencia asociada a una altura o índice de sitio observado (Cieszewski, 2001; Diéguez-

Aranda *et al.*, 2005b). Las segundas, cuyas ventajas han sido puestas de manifiesto en varios estudios, presentan dos importantes propiedades:

- a) Invarianza con respecto a la edad de referencia.
- b) Invarianza respecto al intervalo de proyección.

Esto hace posible que con una única ecuación dinámica se pueda definir conjuntamente la curva de crecimiento de la altura dominante y el modelo de índice de sitio (Álvarez González *et al.*, 2005a).

Bailey y Clutter (1974) fueron los primeros en establecer una metodología, conocida en inglés como *Algebraic Difference Approach* (ADA), para obtener ecuaciones dinámicas con las propiedades antes mencionadas. Esta metodología permitió, por lo tanto, estimar los parámetros de las ecuaciones de crecimiento sin necesidad de establecer un punto de referencia arbitrariamente seleccionado y pudiendo utilizar todos los datos disponibles. La metodología se basa en la posibilidad de modelizar el crecimiento con una familia de curvas que proceden de un modelo base y en el que todos los parámetros son comunes excepto uno, que depende de la estación, pudiéndose obtener, por lo tanto, tantas ecuaciones dinámicas como parámetros tenga dicho modelo base. Dicha metodología proporciona modelos anamórficos (con múltiples asíntotas por definición) o polimórficos con una asíntota común.

Este procedimiento es uno de los tres que se pueden emplear en la construcción de las curvas de crecimiento en altura (Clutter *et al.*, 1983):

- Método de la curva guía.
- Método de predicción de parámetros.
- Método de las ecuaciones en diferencias.

Estos tres métodos de construcción no son mutuamente excluyentes y pueden realizarse diferentes combinaciones entre ellos. Actualmente el método de las ecuaciones en diferencias es el procedimiento más utilizado para ajustar las ecuaciones de crecimiento en altura dominante (Cieszewski y Bailey, 2000; Barrio, 2003; Álvarez González *et al.*, 2005b; Diéguez-Aranda *et al.*, 2005a) y son numerosos los autores que lo han empleado a lo largo del tiempo (p.ej. Bailey y Clutter, 1974; Clutter y Jones, 1980; Borders *et al.*, 1984; McDill y Amateis, 1992; Cao, 1993; Parresol y Vissage, 1998; Calama *et al.*, 2003; Álvarez González *et al.*, 2005b; Barrio y Diéguez-Aranda, 2005; Diéguez-Aranda *et al.*, 2005a).

La generalización de la metodología ADA ha sido propuesta por Cieszewki y Bailey (2000), y se denomina en inglés *Generalized Algebraic Difference Approach* (GADA). La principal ventaja de esta nueva metodología es que las ecuaciones dinámicas se obtienen a partir del mismo modelo base que las ecuaciones ADA, pero permitiendo que más de un parámetro sea dependiente de la estación, lo cual permite generar ecuaciones más flexibles.

Para el empleo de estos métodos es necesario contar con datos longitudinales de parcelas permanentes o de parcelas de intervalo en las que existen dos o más mediciones procedentes de la misma masa (Gadow y Hui, 1999), o bien con datos procedentes del análisis de tronco.

En este trabajo se va a emplear el método basado en el uso de ecuaciones en diferencias algebraicas generalizadas (GADA) con datos longitudinales procedentes de análisis de tronco.

5.2.2.2. Modelos de crecimiento en altura dominante empleados

Las ecuaciones de crecimiento en altura dominante se pueden clasificar en dos tipos distintos, de acuerdo con la familia de curvas que generan (Clutter *et al.*, 1983): curvas polimórficas y curvas anamórficas. Las primeras se denominan también no proporcionales, y se caracterizan porque no presentan proporcionalidad en el valor de la altura dominante entre curvas, y por tanto tienen diferente forma en cualquiera de sus dos variantes (con intersecciones y sin intersecciones). En cambio, las curvas anamórficas o proporcionales muestran una tasa relativa de crecimiento (dH_0/dt)/ H_0 constante para todas las calidades a cualquier edad, por lo que las curvas tienen la misma forma.

Actualmente se admite que la pauta de crecimiento en altura dominante no es la misma para todas las clases de índice de sitio, empleándose por ello curvas polimórficas (Carmean, 1970; Goelz y Burk, 1992; Splechtna, 2001; Barrio, 2003), y que la culminación del crecimiento se produce con anterioridad en las calidades mejores que en las peores (Bull, 1931). Así, la mayoría de los modelos polimórficos presentan un comportamiento similar, mostrando un patrón de crecimiento lento y casi lineal en las peores estaciones y rápido y más curvilíneo en las mejores (Beck, 1971; Carmean, 1972; Borders *et al.*, 1984). Por tanto, teniendo en cuenta todas estas consideraciones, en este trabajo se han empleado únicamente ecuaciones que proporcionan familias de curvas polimórficas.

Los modelos seleccionados derivan de varias ecuaciones de crecimiento base que se han expresado en forma de diferencias algebraicas. A partir de estos modelos expresados en diferencias algebraicas se han generado todas las posibles soluciones polimórficas relacionando un solo parámetro con la estación; y además, para tres de ellas se han obtenido soluciones polimórficas relacionando dos parámetros con la estación. Como ya se ha comentado, los modelos obtenidos al relacionar un parámetro con la estación en una ecuación en diferencias algebraicas, conocidos como ADA (*Algebraic Difference Approach*) no son más que un caso particular de la reciente metodología GADA (*Generalized Algebraic Difference Approach*) (Cieszewski y Bailey, 2000), que permite obtener ecuaciones dinámicas relacionando más de un parámetro con las condiciones específicas de la estación forestal.

Las ecuaciones dinámicas en forma de diferencias algebraicas se basan en obtener la altura Y a la edad t en función de dicha edad, de la altura Y_0 en una primera medición a la edad t_0 y de esta última edad. La expresión final se obtiene después de despejar alguno de los parámetros del modelo en función de t_0 , Y_0 y de los otros parámetros, y luego sustituirlo en el modelo para expresar Y en función de Y_0 , t_0 , t y los parámetros restantes (Ramírez-Maldonado *et al.*, 1988). En las ecuaciones dinámicas en las que se relacionan dos parámetros con la estación es necesario reparametrizar éstos considerando que de cada uno de ellos depende una característica de la estación desconocida, para que de este modo se pueda encontrar una solución matemática. En la mayoría de los modelos, la substitución del parámetro de la asíntota produce familias de curvas anamórficas, la substitución de cualquier otro parámetro produce familias de curvas polimórficas con una asíntota común y la substitución simultánea de más de un parámetro produce familias de curvas polimórficas con asíntotas variables.

A partir de los datos del análisis de tronco se pueden generar seis estructuras de datos diferentes para su uso en el ajuste de modelos expresados como ecuaciones en diferencias algebraicas. Sin embargo, se ha encontrado que la estructura de datos que considera todos los intervalos posibles de crecimiento es la que proporciona unos resultados más estables y consistentes (Barrio, 2003), siendo este tipo de estructura la que se ha empleado en este trabajo.

Para modelizar el crecimiento en altura dominante y emplearlo como indicador de la calidad de estación es necesario que los modelos obtenidos sirvan para estimar la altura dominante a una cierta edad a partir del valor del índice de sitio y la edad de referencia, y también para estimar el valor del índice de sitio conocida la altura dominante y la edad a la que se alcanza (Goelz y Burk, 1996). Aunque esto se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante el ajuste por separado de dos funciones, es más adecuado el empleo de una única función (Carmean *et al.*, 1989), ya que se evita el problema de sesgo en los

parámetros, que surge cuando se emplean ecuaciones individuales para cada uno de ellos (Parresol y Vissage, 1998), y de inconsistencia en las predicciones de la altura y del índice de sitio (Huang, 1997). Para optimizar simultáneamente la regresión de Y sobre X y de X sobre Y , y así evitar el sesgo en los parámetros, Goelz y Burk (1992, 1996) recomiendan ajustar una única ecuación altura-edad en forma de diferencias algebraicas $Y=f(Y_0, t_0, t)$ y con una estructura de datos que considere todos los posibles intervalos de crecimiento. Estas funciones, que permiten obtener simultáneamente una altura dominante o el índice de sitio, se denominan “recíprocas”.

En la Tabla 5.2 se muestran los modelos seleccionados, indicando el modelo del que proceden así como el parámetro que es función del sitio.

Tabla 5.2. Modelos empleados para el ajuste de las curvas de calidad de estación ($Y = f(Y_0, t_0, t)$).

Ecuación base	Parámetro relacionado con la estación	Solución para X con valores iniciales (t_0, Y_0)	Ecuación dinámica
Bertalanffy-Richards:			
$Y = a_1(1 - \exp(-a_2 t))^{a_3}$	$a_3 = X$	$X_0 = \frac{\ln(Y_0/b_1)}{\ln(1 - \exp(-b_2 t_0))}$	$Y = b_0 \left(\frac{Y_0}{b_0} \right)^{\frac{\ln(1 - \exp(-b_1 t))}{\ln(1 - \exp(-b_1 t_0))}}$ CC1
	$a_2 = X$	$X_0 = -\ln(1 - (Y_0/b_1)^{1/b_3})/t_0$	$Y = b_1 \left(1 - \left(1 - \left(\frac{Y_0}{b_1} \right)^{1/b_3} \right)^{t/t_0} \right)^{b_3}$ CC2
	$a_1 = \exp(X)$ $a_3 = b_2 + b_3/X$	$X_0 = \frac{1}{2}(\ln Y_0 - b_2 L_0) \pm \sqrt{(\ln Y_0 - b_2 L_0)^2 - 4b_3 L_0}$ con $L_0 = \ln(1 - \exp(-b_1 t_0))$	$Y = Y_0 \left(\frac{1 - \exp(-b_1 t)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right)^{(b_2 + b_3/X_0)}$ CC3
Korf			
$Y = a_1 \exp(-a_2 t^{-a_3})$	$a_2 = X$	$X_0 = -\ln\left(\frac{Y_0}{a_1}\right) t_0^{a_3}$	$Y = b_1 \left(\frac{Y_0}{b_1} \right)^{\left(\frac{t_0}{t}\right)^{b_3}}$ CC4
	$a_3 = X$	$X_0 = -\ln\left(\frac{\ln(Y_0/a_1)}{-a_2}\right) / \ln(t_0)$	$Y = b_0 \exp\left(-b_1 t^{\left(\frac{\ln(Y_0/b_0)}{-b_1}\right) / \ln t_0}\right)$ CC5
	$a_1 = \exp(X)$ $a_2 = b_1 + b_2/X$	$X_0 = \frac{1}{2} t_0^{-b_3} \left(b_1 + t_0^{b_3} \ln(Y_0) \pm \sqrt{4b_2 t_0^{b_3} + (-b_1 - t_0^{b_3} \ln(Y_0))^2} \right)$	$Y = \exp(X_0) \exp(-(b_1 + b_2/X_0) t^{-b_3})$ CC6
Sloboda			
$Y = a_1 \exp\left(-a_2 \exp\left(\frac{a_3}{(a_4 - 1)t^{(a_4 - 1)}}\right)\right)$	$a_2 = X$	$X_0 = -\frac{\ln(Y_0/a_1)}{\exp(a_3/(a_4 - 1)t_0^{(a_4 - 1)})}$	$Y = b_0 \left(\frac{Y_0}{b_0} \right)^{\exp\left(\frac{b_2}{(b_3 - 1)t^{(b_3 - 1)}} - \frac{b_2}{(b_3 - 1)t_0^{(b_3 - 1)}}\right)}$ CC7
Hossfeld I			
$Y = \frac{t^2}{a_1 + a_2 t + a_3 t^2}$	$a_2 = X$	$X_0 = \frac{t_0}{Y_0} - \frac{a_1}{t_0} - a_3 t_0$	$Y = \frac{t^2}{b_1 + t \left(\frac{t_0}{Y_0} - \frac{b_1}{t_0} + b_3(t - t_0) \right)}$ CC8

Hossfeld IV	$a_1 = X$	$X_0 = Y_0 \left(1 + (a_4/S)/t_0^{a_3} \right)$	$Y = \frac{Y_0 + d + r}{2 + 4b_3 \frac{t^{-b_2}}{(Y_0 - d + r)}}$	CC9
	asumiendo $a_2 = \frac{a_4}{S}$		con $d = b_3 A s t^{-b_2}$	
			y $r = \sqrt{(Y_0 - d)^2 + 4b_3 Y_0 t_0^{-b_2}}$	
	$a_1 = b_1 + X$	$X_0 = \frac{1}{2} \left(Y_0 - b_1 \pm \sqrt{(Y_0 - b_1)^2 + 4b_2 Y_0 t_0^{-b_3}} \right)$	$Y = \frac{b_1 + X_0}{1 + b_2/X_0 t^{-b_3}}$	CC10
	$a_2 = b_2/X$			
McDill-Amateis	$a_3 = X$	$X_0 = \left(\frac{a_1}{Y_0} - 1 \right) t_0^{a_2}$	$Y = \frac{b_0}{1 + \left(\frac{b_0}{Y_0} - 1 \right) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{b_1}}$	CC11

Las ecuaciones CC1, CC2 y CC3 fueron formuladas a partir de la forma integral de la ecuación base de Bertalanffy-Richards (Bertalanffy, 1949, 1957; Richards, 1959). Su expresión se obtiene expresando la ecuación base en diferencias algebraicas y resolviendo a_3 en el primer caso y a_2 en el segundo. La ecuación CC3 es resultado de relacionar los parámetros a_1 y a_3 con la estación, según las expresiones que aparecen en la Tabla 5.2. Las dos primeras soluciones se han utilizado con frecuencia en los estudios sobre la modelización del crecimiento en altura dominante de diversas especies forestales en la Península Ibérica (p.ej. Fontes *et al.*, 2003; Palahí *et al.*, 2003; Álvarez González *et al.*, 2005b; Barrio y Diéguez-Aranda, 2005; Diéguez-Aranda *et al.*, 2005a, 2005b). El modelo dinámico obtenido al relacionar dos parámetros con la estación (ecuación CC3) fue también empleado para modelizar el crecimiento en altura dominante de *Pinus taeda* en Georgia (EEUU) con el objetivo de probar distintas metodologías de ajuste (Cieszewski *et al.*, 2000).

Las ecuaciones CC4, CC5 y CC6 son formas polimórficas del modelo base de Korf (citado en Lundqvist, 1957) y que habitualmente es conocido como modelo de Bailey y Clutter (1974) o de Schumacher (1939). Los dos primeros modelos se obtienen a partir de la ecuación base expresada en diferencias algebraicas y resolviendo el parámetro b_1 y b_2 , respectivamente. La tercera ecuación (CC6) se obtiene al relacionar los parámetros b_0 y b_1 con la estación según la expresión indicada en la Tabla 5.2. Los dos primeros modelos han sido usados con reiteración para modelizar el crecimiento en altura dominante (p.ej. Tomé *et al.*, 2001; Fontes *et al.*, 2003; Palahí *et al.*, 2003; Álvarez González *et al.*, 2005b; Barrio y Diéguez-Aranda, 2005 y Diéguez-Aranda *et al.*, 2005a). De entre estas dos soluciones polimórficas, es el modelo (CC4) el que ha proporcionado mejores resultados, siendo seleccionado por Tomé *et al.* (2001) y Barrio y Diéguez-Aranda (2005) para la construcción de las curvas de calidad para *Eucalyptus globulus* en Portugal y *Quercus robur* en Galicia, respectivamente. Por su parte, el modelo CC6 ha sido empleado recientemente por Barrio *et al.* (2005) para desarrollar un modelo de crecimiento en área basimétrica para masas de *Pinus pinaster* en Galicia.

La ecuación dinámica CC7 es una solución polimórfica de la ecuación base de Sloboda (1971) y ha sido probado en Galicia para modelizar el crecimiento en altura dominante para *Quercus robur* (Barrio y Diéguez-Aranda, 2005) y para *Pinus sylvestris* (Diéguez-Aranda *et al.*, 2005a), siendo, en ambos casos, uno de los modelos que proporcionó mejores resultados. También ha sido probado para estudiar la calidad de estación de cinco especies de pino en México (Corral Rivas *et al.*, 2004).

El modelo CC8 es la solución para el parámetro a_2 del modelo básico de Hossfeld (1822, cit. en Kiviste *et al.*, 2002) expresado en diferencias algebraicas. Dicho modelo base ha sido usado en España para la construcción de curvas de calidad de diferentes especies (Pita,

1964, 1965, 1966 y 1967) y la solución polimórfica empleada en este trabajo fue el mismo modelo elegido para la elaboración de las curvas de calidad de *Pinus sylvestris* en el noreste de España (Palahí *et al.*, 2003).

Las ecuaciones dinámicas CC9 y CC10 han sido desarrolladas a partir del modelo de Hossfeld IV. Los modelos derivados a partir de la ecuación de Hossfeld IV (cit. en Kiviste *et al.*, 2002) han sido muy empleados a lo largo de la historia para describir una gama amplia de dinámicas de poblaciones (p.ej. Monserud, 1988; Cieszewski, 2000, 2001, 2002, 2003). La expresión del primer modelo (modelo CC9) es una solución especial propuesta por Cieszewski y Bella (1989) y ha sido empleada para elaborar las curvas de calidad de estación para *Pinus sylvestris* en Suecia (Elfving y Kiviste, 1997). Este modelo también ha sido uno de los que mejores resultados ha proporcionado en los trabajos de Corral *et al.* (2004), Barrio y Diéguez-Aranda (2005) y Diéguez-Aranda *et al.* (2005a, 2005b). Para ajustar dicho modelo se han probado valores de *Asi* (edad de referencia del índice de sitio) de 5 en 5 años entre los 40 y 90 años. Los resultados proporcionaron los mejores estadísticos para el valor de 40 años, que ha sido el valor empleado para realizar el ajuste definitivo del modelo. El siguiente modelo (CC10) es una solución especial de la ecuación de Hossfeld IV propuesta por Cieszewski (2002) y que ha mostrado buenos resultados.

El último modelo empleado (CC11) es la ecuación propuesta por McDill y Amateis (1992), expresada en diferencias algebraicas, y resuelta para el parámetro a_2 . Dicho modelo ha sido empleado con éxito para modelizar el crecimiento en altura en numerosos estudios (p.ej. Sharma *et al.*, 2002; Fontes *et al.*, 2003; Diéguez-Aranda *et al.*, 2005a).

5.2.3. Metodología de ajuste

5.2.3.1. Ajuste de curvas de calidad con datos longitudinales

Como ya se ha explicado en el apartado 4.2.3.1 del Capítulo 4, uno de los problemas más importantes a la hora de ajustar ecuaciones de regresión para modelizar el crecimiento en altura es la dependencia temporal o autocorrelación entre mediciones. Esto es debido a que se emplean datos que constan de varias observaciones de la variable altura a lo largo del tiempo para cada uno de los árboles. Este tipo de datos se denominan datos longitudinales, en contraposición con los datos transversales, en los que se dispone de una única medición de la variable en cuestión para cada árbol.

Al igual que se ha hecho con las funciones de perfil, para las curvas de calidad se ha corregido la autocorrelación entre errores inherente a datos procedentes de parcelas permanentes o análisis de troncos, empleando mínimos cuadrados generalizados no lineales modelizando la estructura del error mediante un modelo autorregresivo de orden 1 (AR1). Para ello se ha procedido a realizar un ajuste de la estructura de la media (ecuación dinámica) y de la estructura del error (modelo autorregresivo) de forma simultánea mediante el procedimiento MODEL del programa SAS/ETS (SAS Institute Inc., 2001), que permite una actualización dinámica de los residuos (Parresol y Vissage, 1998).

En este trabajo se ha empleado una estructura de datos con todos los posibles intervalos de crecimiento. En este caso la estructura del error, de acuerdo con Goelz y Burk (1992), se debe expresar como se indica en la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = f(X_i, Y_j, X_j, \beta) + \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_{ij} = \rho \cdot \varepsilon_{i-1,j} + \gamma \cdot \varepsilon_{i,j-1} + e_{ij} \quad (\text{ec.5.1})$$

donde Y_{ij} representa la predicción de la altura i usando la altura j (Y_j), la edad i (X_i), y la edad j (X_j con $j \neq i$); β es el vector de parámetros a estimar; ε_{ij} representa el error bajo la condición de no independencia; el parámetro ρ representa la autocorrelación entre el residuo actual (correspondiente a la estimación Y_{ij}) y el residuo correspondiente a la estimación Y_{i-1} usando Y_j como variable predictora; el parámetro γ representa la relación entre el residuo actual y el residuo de la estimación de Y_i usando Y_{j-1} como variable predictora; el término e_{ij} representa al error estocástico del modelo $e_{ij} \approx N(0, \sigma)$, independiente e idénticamente distribuido.

Debe tenerse en cuenta que en la expresión definitiva de los modelos se ignoran los valores de los parámetros de la estructura de autocorrelación del error, ya que el principal propósito de su uso es obtener una estimación de los parámetros " β " de la estructura de la media (modelo dinámico), insesgados y más eficientes. Además, en la práctica no se conocen los errores ε_{i-1} ó ε_{i-2} sin un análisis de tronco (Huang, 1997; Parresol y Vissage, 1998).

A modo de resumen, el proceso que se ha seguido para ajustar los modelos GADA autorregresivos con todos los posibles intervalos de crecimiento ha constado de los siguientes pasos:

1. Determinación de todos los posibles intervalos de crecimiento entre los pares altura-edad para cada árbol.
2. Ajuste del modelo sin considerar la estructura del error.

3. Determinación de los errores ε_{ij} , $\varepsilon_{i-1,j}$ y $\varepsilon_{i,j-1}$.
4. Ajuste de un modelo lineal en el que la variable dependiente es el residuo ε_{ij} y las variables independientes son los residuos $\varepsilon_{i-1,j}$ y $\varepsilon_{i,j-1}$.
5. Ajuste de la media (dada por la ecuación de crecimiento) y de la estructura del error (dada por el modelo autorregresivo) simultáneamente mediante el procedimiento MODEL de SAS/ETS (SAS Institute Inc., 2001), empleando los valores de los parámetros obtenidos en los pasos 2 y 4 como inicializadores para el análisis de regresión.

5.2.3.2. Comparación y selección de modelos

Para la comparación y selección de las estimaciones de los modelos ajustados se han usado tanto estadísticos de comparación como procedimientos gráficos.

Los estadísticos de comparación calculados para cada uno de los modelos han sido los siguientes: la raíz del error medio cuadrático (*REMC*), que analiza la precisión de las estimaciones; el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), que refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo y que tiene en cuenta el número total de parámetros a estimar; y el criterio de información de Akaike (*AIC*). Un modelo será mejor que otro si presenta menores valores *REMC* y *AIC* y un valor mayor de R^2_{Adj} . Las expresiones de cada uno de los estadísticos pueden verse en el Capítulo 1.

El último criterio, y no por ello menos importante, que se ha empleado para seleccionar el modelo más adecuado, ha consistido en un análisis gráfico. Para ello se han analizado los gráficos de valores observados frente a los valores predichos y los gráficos de evolución con la edad del error medio cuadrático, así como se han representado las curvas de calidad ajustadas para distintos índices de sitio superpuestas sobre las trayectorias reales de los árboles empleados en el ajuste. Este último punto del análisis gráfico es uno de los aspectos más importantes a la hora de seleccionar el modelo de crecimiento en altura dominante más adecuado. Es fundamental comprobar que las curvas estimadas por el modelo se ajustan a las trayectorias reales de los árboles. Además, puede ocurrir que curvas con iguales estadísticos de comparación tengan apariencias gráficas muy distintas (Huang, 1997; Barrio, 2003; Álvarez González *et al.*, 2005b; Barrio y Diéguez-Aranda, 2005).

5.3. Resultados

5.3.1. Elección del mejor modelo

En la Tabla 5.3 se presentan las estimaciones de los parámetros, su error estándar y significación, resultantes del ajuste de los once modelos dinámicos considerando una estructura autorregresiva de orden 1 para los errores y ajustados sobre una estructura de datos que considera todos los posibles intervalos de crecimiento. En la Tabla 5.4 se presentan los valores de los estadísticos de comparación de dichos modelos.

Tabla 5.3. Valores de los parámetros, errores estándar y nivel de significación de los modelos de calidad de estación ajustados para el total de los datos.

Modelo	Parámetro	Estimación	Error estándar	Pr>t
CC1	b_0	44,2323	0,7000	<,0001
	b_1	0,0041	0,0001	<,0001
	ρ	-0,9054	0,0042	<,0001
	γ	-0,1494	0,0038	<,0001
CC2	b_1	18,6659	0,0720	<,0001
	b_3	1,3126	0,0025	<,0001
	ρ	-0,9270	0,0036	<,0001
	γ	-0,1330	0,0032	<,0001
CC3	b_1	0,0163	0,0001	<,0001
	b_2	-0,8079	0,0381	<,0001
	b_3	6,1171	0,1094	<,0001
	ρ	-0,9164	0,0038	<,0001
	γ	-0,1379	0,0034	<,0001
CC4	b_1	319,3027	11,1119	<,0001
	b_3	0,2941	0,0019	<,0001
	ρ	-0,9367	0,0035	<,0001
	γ	-0,1194	0,0032	<,0001
CC5	b_0	129,6093	3,0451	<,0001
	b_1	8,1345	0,0143	<,0001
	ρ	-0,9872	0,0030	<,0001
	γ	-0,0808	0,0027	<,0001
CC6	b_1	0,0036	0,0020	0,0719
	b_2	62,3206	0,7127	<,0001
	b_3	0,1931	0,0018	<,0001
	ρ	-0,9442	0,0035	<,0001

	γ	-0,117320	0,003130	<,0001
CC7	b_0	72,5217	1,8197	<,0001
	b_1	0,2256	0,0015	<,0001
	b_2	0,8596	0,0033	<,0001
	ρ	-0,9219	0,0038	<,0001
	γ	-0,1324	0,0034	<,0001
CC8	b_1	8,2775	0,1047	<,0001
	b_3	0,0202	0,0002	<,0001
	ρ	-0,9527	0,0035	<,0001
	γ	-0,1105	0,0032	<,0001
CC9	b_2	1,3097	0,0024	<,0001
	b_3	2.046,3110	8,7046	<,0001
	ρ	-0,9305	0,0035	<,0001
	γ	-0,1271	0,0032	<,0001
CC10	b_1	21,2343	0,2963	<,0001
	b_2	607,3497	65,6256	<,0001
	b_3	1,3141	0,0025	<,0001
	ρ	-0,9286	0,0036	<,0001
	γ	-0,1280	0,0032	<,0001
CC11	b_0	24,2616	0,1249	<,0001
	b_1	1,3013	0,0023	<,0001
	ρ	-0,9275	0,0036	<,0001
	γ	-0,1294	0,0032	<,0001

Tabla 5.4. Valores de los estadísticos de comparación para los diferentes modelos de calidad de estación ajustados.

Modelo	REMC	R²_{Adj}	AIC
CC1	0,613	0,976	-34.501,58
CC2	0,538	0,981	-43.691,58
CC3	0,530	0,982	-44.798,77
CC4	0,572	0,979	-39.446,82
CC5	0,776	0,961	-17.924,35
CC6	0,608	0,976	-35.137,54
CC7	0,556	0,980	-41.463,35
CC8	0,634	0,974	-32.110,65
CC9	0,541	0,981	-43.385,42
CC10	0,536	0,981	-43.960,69
CC11	0,538	0,981	-43.722,19

Como se puede observar, el modelo con unos mejores estadísticos de comparación es el CC3, seguido muy de cerca por los modelos CC10, CC11, CC2 y CC9, sin diferencias apreciables entre ellos.

En la Figura 5.3 se representa gráficamente la evolución con la edad de los valores de la raíz del error medio cuadrático para cada uno de los once modelos analizados.

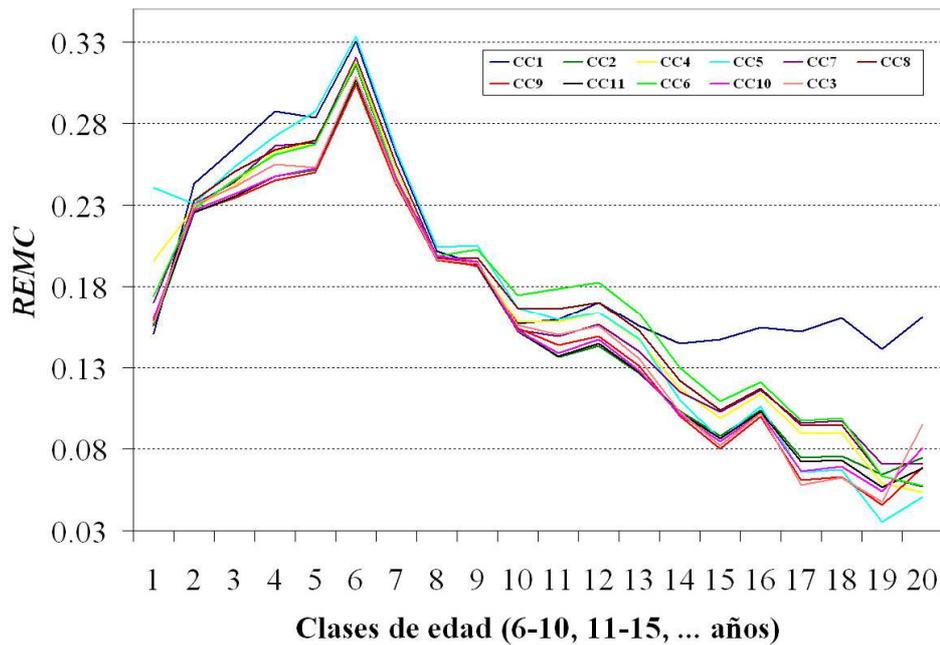
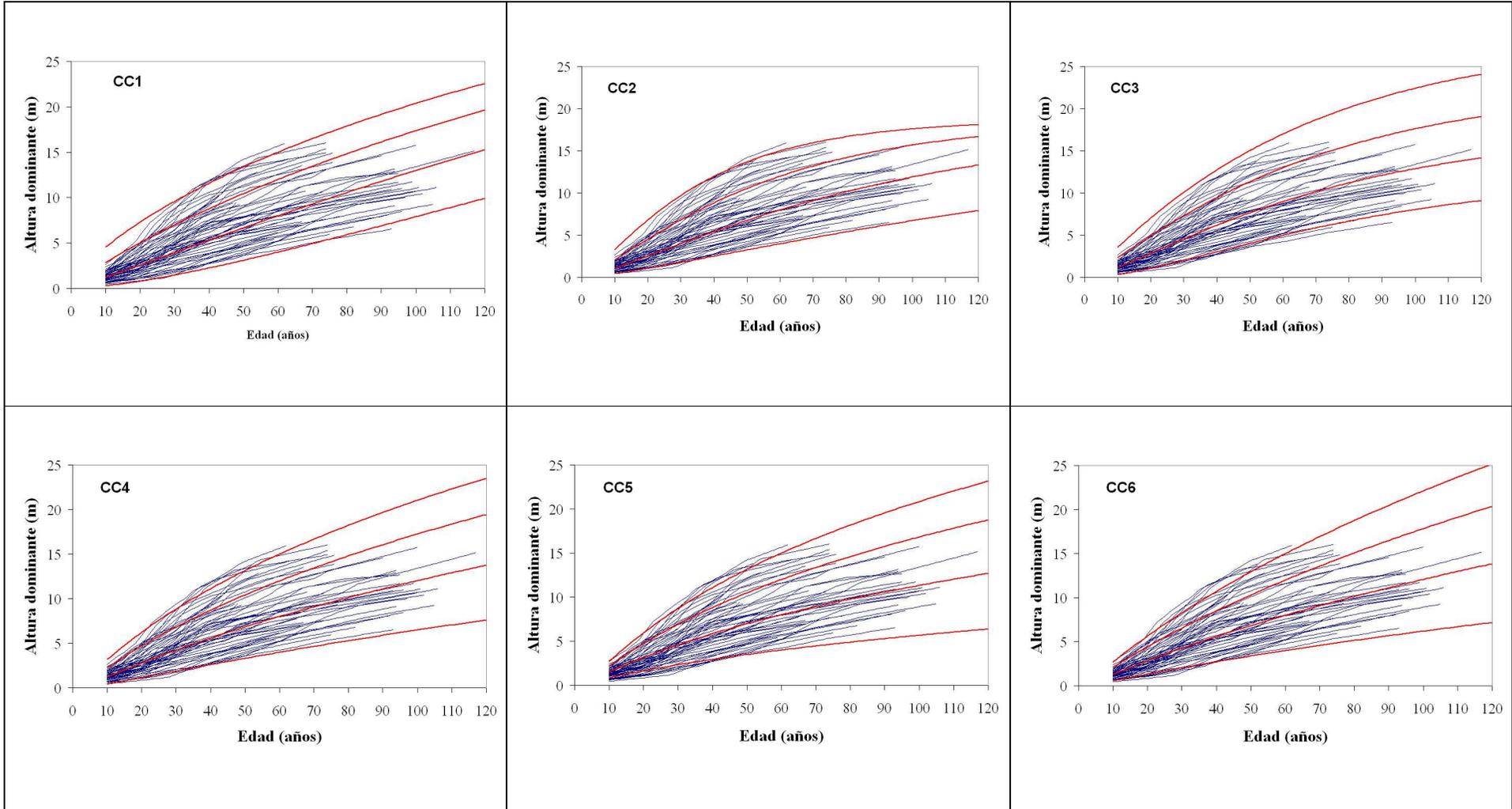


Figura 5.3. Representación gráfica de la evolución de la raíz del error medio cuadrático con la edad para los 11 modelos analizados.

En la Figura 5.3 se observa que los modelos con menor valor de la raíz del error medio cuadrático (*REMC*) para la práctica totalidad de las clases de edades son el CC9, CC11, CC10 y CC2.

Como ya se ha comentado anteriormente, es fundamental comprobar que las curvas estimadas por los modelos se ajustan a las trayectorias reales de los árboles. Por ello, en la Figura 5.4 se representan las curvas de calidad obtenidas a partir de los diferentes modelos ajustados frente a los gráficos de perfil de los árboles empleados en los ajustes.



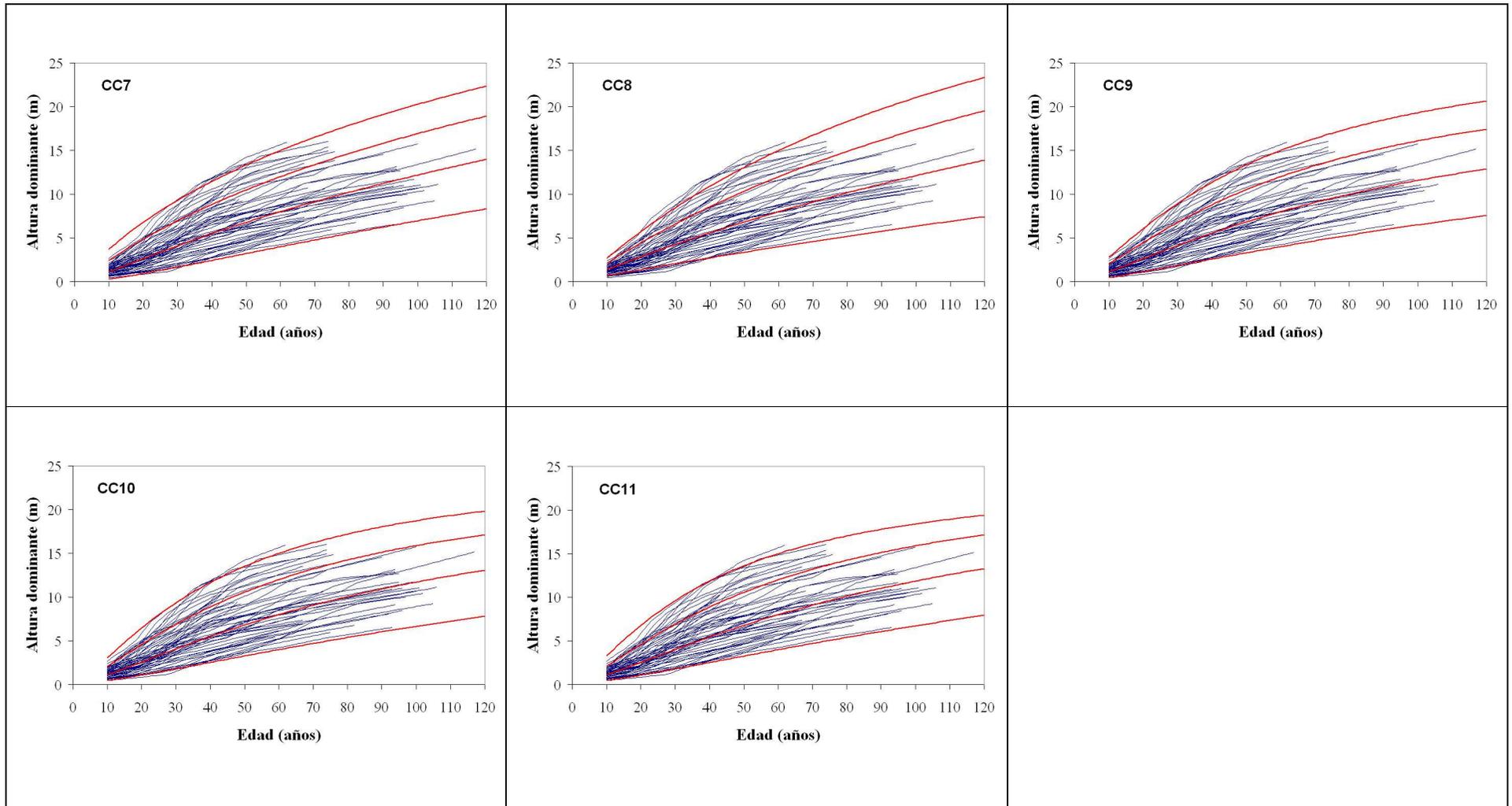


Figura 5.4. Comparación gráfica de las curvas de calidad construidas para cada uno de los 11 modelos analizados. Las curvas se han representado para valores del índice de sitio de 4, 8, 12 y 15 m de altura dominante a la edad de 60 años.

Como se puede observar, la apariencia gráfica de unos modelos varía bastante con respecto a otros, incluso cuando presentan estadísticos de comparación bastantes similares. Por tanto, se confirma también en este estudio lo que otros autores han apuntado previamente a este respecto.

Además, del análisis de la figura anterior se deduce que los modelos que mejor se adaptan a las trayectorias reales de los árboles son el CC9 y el CC10. Dichos modelos también presentan unos valores muy buenos de los estadísticos empleados en la comparación de los modelos. Comparando las curvas obtenidas con ambas ecuaciones (Figura 5.5), puede apreciarse que el modelo CC10 tiende a sobreestimar un poco más los valores de las mejores calidades a edades jóvenes, aunque a edades más avanzadas las curvas se ajustan bastante bien a la tendencia de los datos.

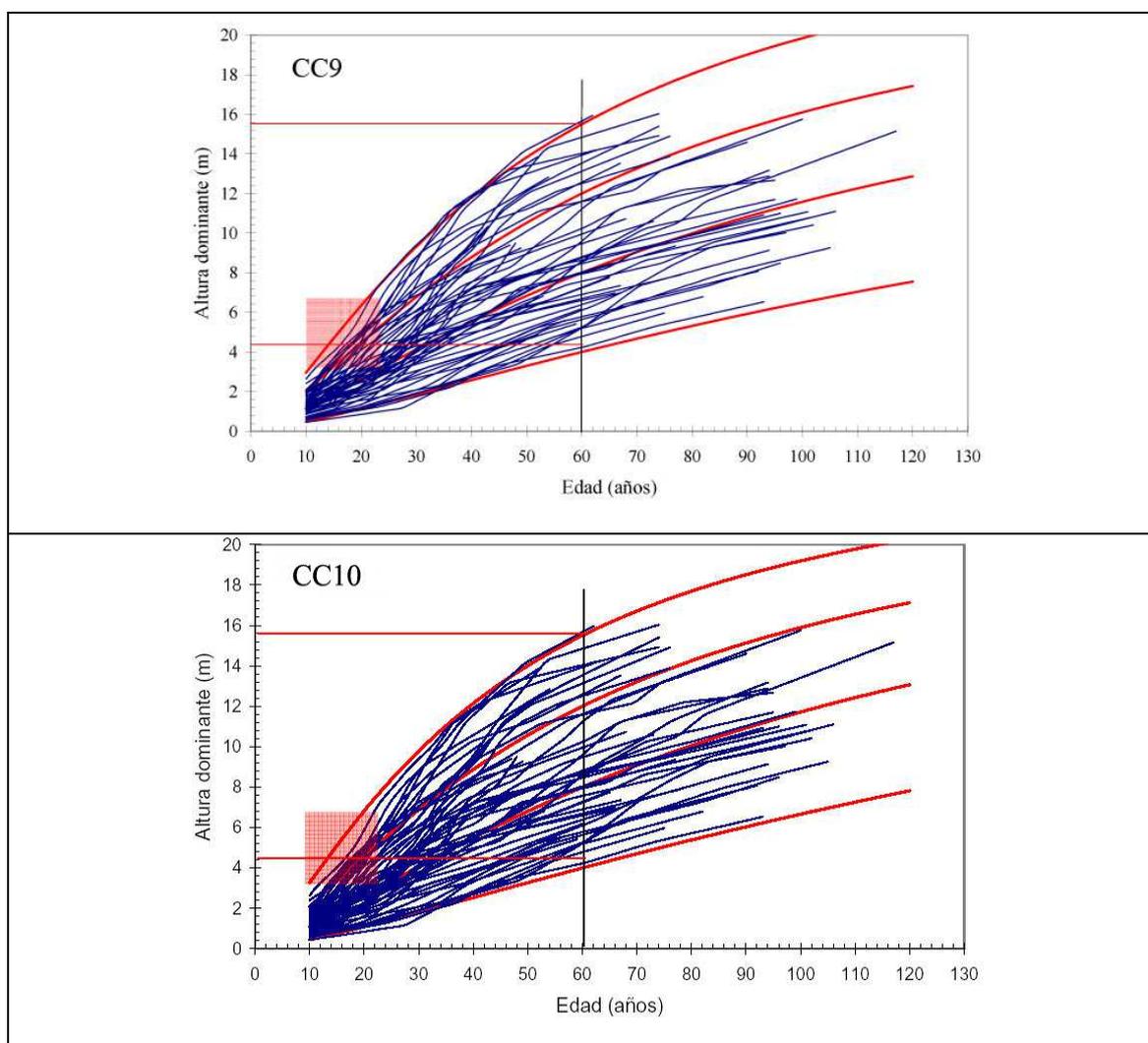


Figura 5.5. Comparación gráfica de las curvas de calidad elaboradas a partir de los modelos CC9 y CC10 superpuestas con los gráficos de perfil de la muestra.

Por tanto, después de analizar los valores de los estadísticos de comparación y el comportamiento del error medio cuadrático por clases de edad, y de representar gráficamente las curvas para cada uno de los modelos ensayados, se ha elegido la ecuación dinámica CC9 (Hossfeld IV, cit. en Kiviste *et al.*, 2002) para representar las calidades de *Pinus halepensis* en la zona de estudio. Este modelo, además de ser polimórfico y presentar múltiples asíntotas, es parsimonioso (presenta sólo dos parámetros). La expresión final del modelo, incluyendo los valores de los parámetros obtenidos en el ajuste de regresión, es la siguiente:

$$H_2 = \frac{H_1 + 16,3229 + \sqrt{(H_1 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_1 \cdot t_1^{-1,3097}}}{2 + 8.185,244 \frac{t_2^{-1,3097}}{(H_1 - 16,3229 + \sqrt{(H_1 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_1 \cdot t_1^{-1,3097}})}} \quad (\text{ec.5.2})$$

siendo H_2 y H_1 las alturas dominantes (m) a las edades t_2 y t_1 , respectivamente.

Como ya se ha indicado, se ha adoptado el índice de sitio como indicador para determinar la productividad potencial de un área forestal. Este índice es una expresión de la calidad de estación y representa la altura de los árboles dominantes y codominantes a una determinada edad índice o de referencia (Carmean, 1970). Esta edad de referencia es habitual que se haga coincidir con la culminación del crecimiento medio, o a los dos tercios del turno de una calidad media (Pita, 1991). Pita (1965) y Erviti (1991) fijaron como edad de referencia para *Pinus halepensis* los 40 años, pero Montero *et al.* (2000) han utilizado más recientemente la edad de 80 años. La edad de referencia utilizada en este estudio para la construcción de las curvas de calidad ha sido 60 años. Para su elección se ha calculado el error relativo de la altura dominante predicha y se ha buscado una edad de referencia tal que minimice el error y a la vez exista un gran número de árboles que hayan alcanzado ese valor de la edad. Como puede apreciarse en la Figura 5.6. esto ocurre a la edad de 60 años, para el modelo finalmente seleccionado.

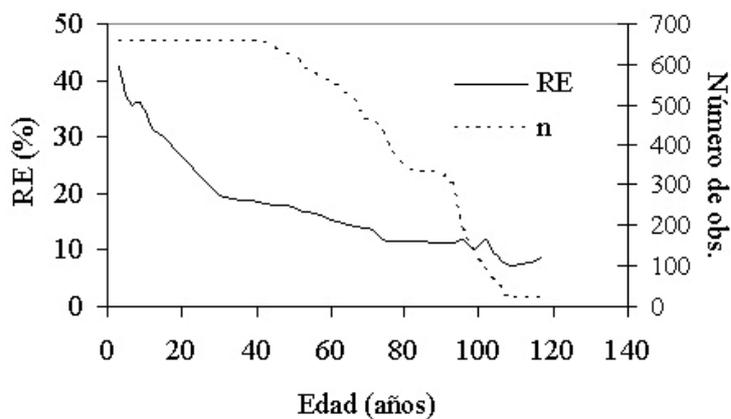


Figura 5.6. Error relativo de la altura dominante predicha y número de observaciones, con la edad.

En la Figura 5.7 se representan las curvas que se proponen para definir las calidades de estación en el área de estudio, superpuestas sobre las trayectorias de los árboles empleados. Las curvas propuestas (trazo grueso) representan los valores medios de las "fajas" de calidad que aparecen en distintos colores. En la Figura 5.8 se representan las curvas sin los gráficos de los perfiles de los árboles. Como se puede ver en la Figura 5.7, con tres calidades (6, 10 y 14 metros de altura dominante a los 60 años) es suficiente para clasificar los montes de la zona en clases de calidad. Puesto que habitualmente para cada una de las calidades de estación se elabora una tabla de producción, la definición de más calidades sólo estaría justificada en especies de mayor productividad que el pino de alepo.

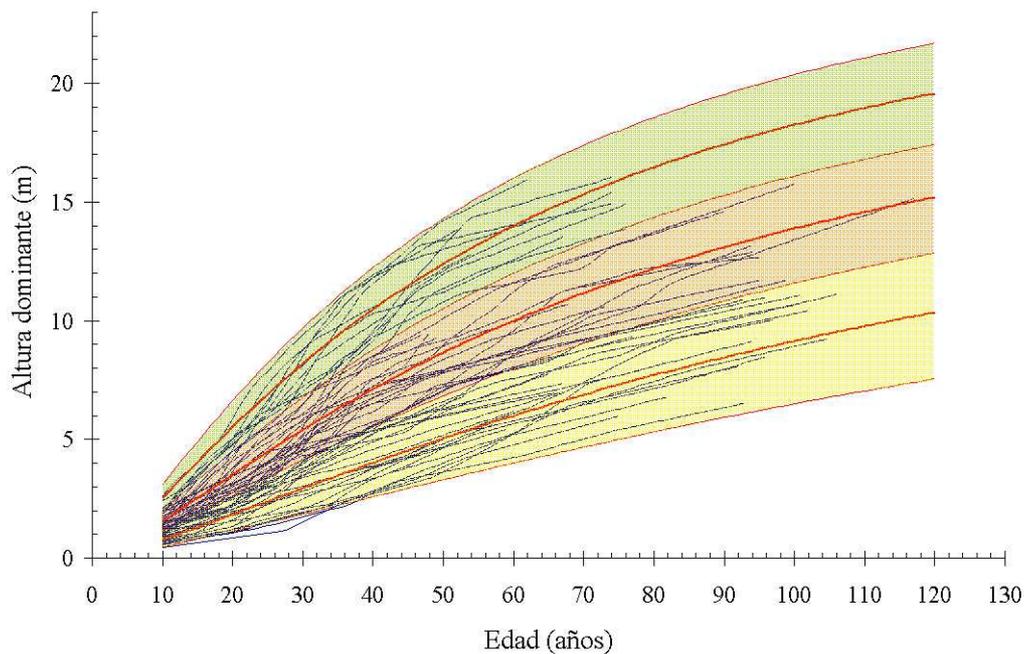


Figura 5.7. Curvas de calidad para *Pinus halepensis* para el conjunto de montes de la zona de Zuera y la Sierra de Alcubierre (Zaragoza y Huesca), superpuestas sobre los gráficos de perfil de los árboles empleados en el ajuste. Las curvas representan el valor medio de la calidad de cada una de las fajas o clases de calidad que aparecen coloreadas.

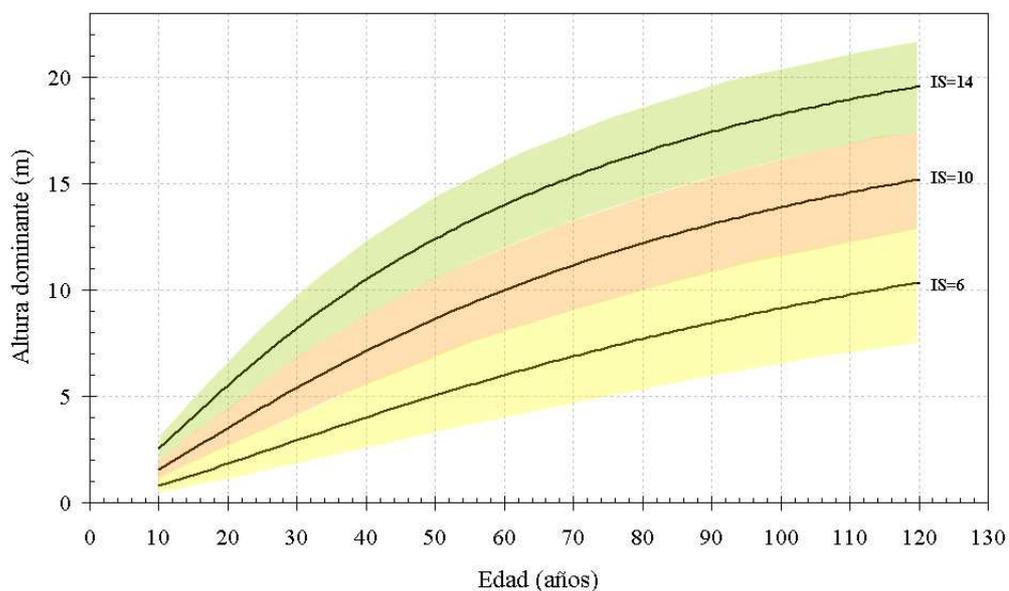


Figura 5.8. Curvas de calidad para *Pinus halepensis* para el conjunto de montes de la zona de Zuera y la Sierra de Alcubierre (Zaragoza y Huesca). Las curvas representan el valor medio de la calidad de cada una de las fajas o clases de calidad que aparecen coloreadas.

5.3.2. Comparación con otras curvas de calidad para *Pinus halepensis* Mill.

Una vez que se han construido las curvas de calidad de estación para las masas naturales de *Pinus halepensis* en una amplia zona del valle del Ebro, se ha llevado a cabo su comparación con las curvas de calidad de estación elaboradas para la especie en otras zonas de España por Pita (1965), Erviti (1991) y Montero *et al.* (2000). También se han comparado con las curvas elaboradas por Franz y Forster (1980) y Vennetier y Herve (1999) para Argelia y Francia, respectivamente.

En la Figura 5.9 se han representado las curvas de calidad elaboradas por los autores anteriormente comentados, superpuestas sobre los gráficos de perfil de la muestra de árboles empleada en este estudio y las curvas del modelo seleccionado en esta tesis. Como puede observarse, todas las curvas empleadas para comparar representan calidades superiores a las encontradas en el área de este estudio. Entre las curvas españolas existentes para la especie, son las curvas elaboradas por Pita (1965) las que mejor se ajustan a los datos empleados en este trabajo, aunque la calidad superior es sensiblemente superior a la observada en los montes estudiados. Por otra parte, tanto las curvas elaboradas por Erviti (1991) como las de Montero *et al.* (2000) presentan calidades de estación muy superiores a las observadas en este estudio, y en cambio no presentan curvas para calidades tan bajas como las que aparecen en los montes estudiados.

Por tanto, una primera conclusión es que las curvas de Erviti (1991) no definen todos los rangos de calidades de la especie en España, sobre todo las calidades inferiores. Esto mismo ocurre con las curvas de Montero *et al.* (2000) y, aunque establecieron 4 curvas, para 11, 14, 17 y 20 metros a 80 años, solo hicieron las tablas de selvicultura para las calidades de 14 y 17 por considerar que son las más ampliamente representadas en España. Sin embargo, éste no parece ser el caso de las masas de este estudio. Ellos mismos hacen una comparación de sus curvas con las de Pita (1965) y manifiestan que sus tres primeras calidades son parecidas, pero que no han tenido en cuenta la calidad 7 de Pita, aunque sí han hecho una de 11.

En cuanto a las curvas elaboradas para otros países mediterráneos, las argelinas de Franz y Forster (1980) cubren un rango de calidades muy similar al observado en este estudio, y también se adaptan bastante bien a las trayectorias de los árboles.

Por otro lado, las curvas francesas (Vennetier y Herve, 1999) muestran, al igual que las de Erviti (1991), calidades superiores a las observadas en el Valle del Ebro.

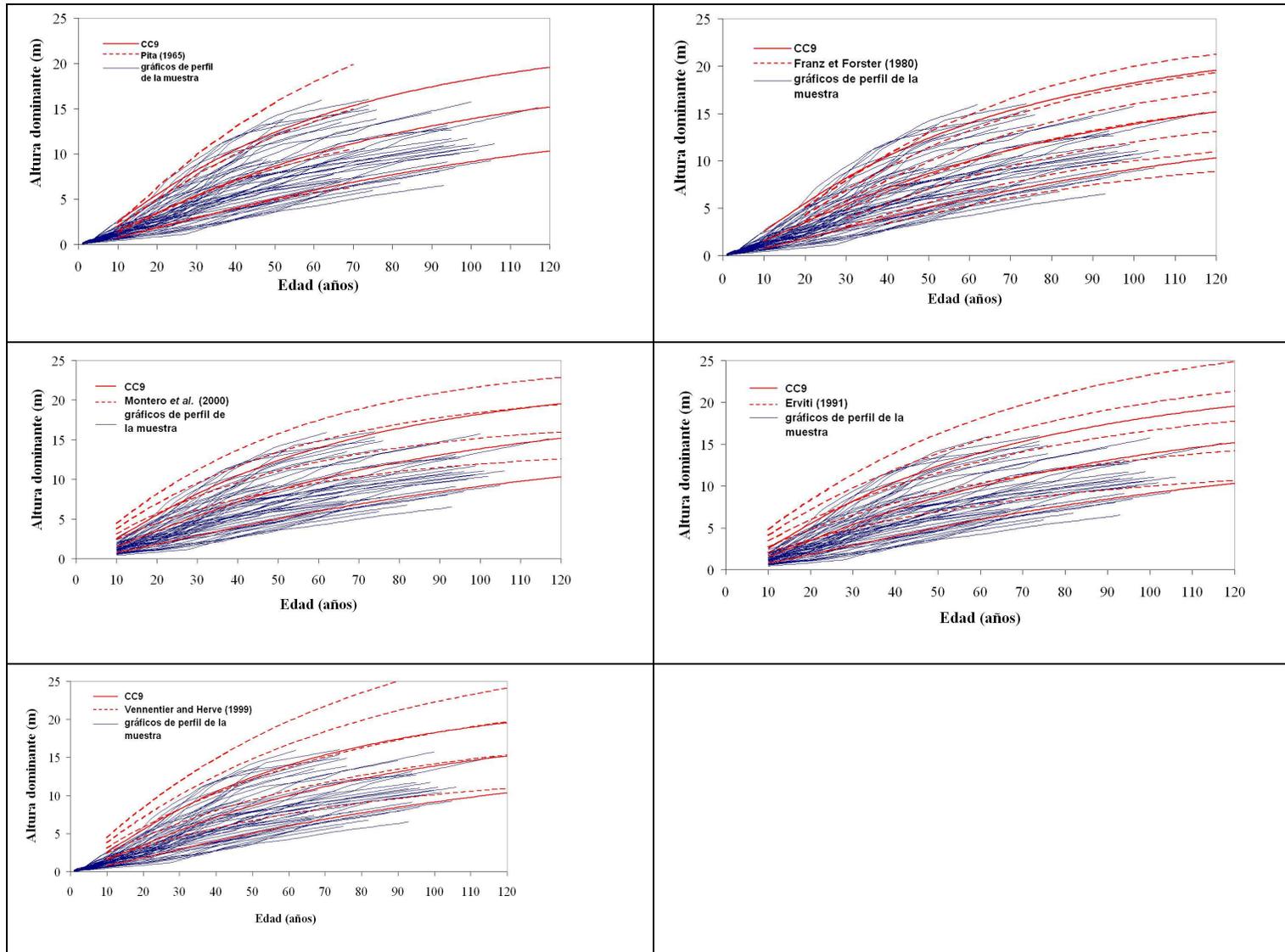


Figura 5.9. Comparación entre las curvas de calidad elaboradas en este trabajo (modelo CC9 para 14, 10 y 6 m de altura dominante a la edad de 60 años) y las curvas de calidad construidas para esta especie por otros autores, superpuestas sobre los gráficos de perfil de los árboles de la muestra empleada.

5.4. Conclusiones

El modelo elegido para representar las calidades de *Pinus halepensis* en la zona de estudio es el CC9 (Hossfeld IV, cit. en Kiviste *et al.*, 2002), cuya expresión final, incluyendo los valores de los parámetros obtenidos en el ajuste de regresión, es la siguiente:

$$H_2 = \frac{H_1 + 16,3229 + \sqrt{(H_1 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_1 \cdot t_1^{-1,3097}}}{2 + 8.185,244 \frac{t_2^{-1,3097}}{(H_1 - 16,3229 + \sqrt{(H_1 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_1 \cdot t_1^{-1,3097}})}} \quad (\text{ec.5.3})$$

siendo H_2 y H_1 las alturas dominantes (m) a las edades t_2 y t_1 , respectivamente.

Se han establecido tres calidades, 6, 10 y 14 metros de altura dominante a los 60 años, suficientes para clasificar los montes de la zona de estudio, dada su baja productividad. Su representación gráfica puede verse en la Figura 5.8.

Para conocer la altura dominante (H_0) a una edad determinada (t), dado un índice de sitio (IS) asociado a la edad de referencia, en este caso 60 años, bastaría con sustituir en la ecuación (ec.5.3.) anterior t_1 por el valor de 60 y H_1 por IS , resultando entonces la siguiente expresión:

$$H_0 = \frac{IS + 16,3229 + \sqrt{(IS - 16,3229)^2 + 38,3872 \cdot IS}}{2 + 8.185,244 \frac{t^{-1,3097}}{(IS - 16,3229 + \sqrt{(IS - 16,3229)^2 + 38,3872 \cdot IS})}} \quad (\text{ec.5.4})$$

De forma similar, se puede estimar el índice de sitio (IS) asociado a la edad de referencia, conocida la altura dominante de la parcela (H_0) y su edad (t), sustituyendo en este caso en la ecuación (ec.5.3.) H_2 por IS y t_2 por el valor de la edad de referencia, 60 años en este caso, como ya se ha comentado. La expresión resultante, entonces, es la siguiente:

$$IS = \frac{H_0 + 16,3229 + \sqrt{(H_0 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_0 \cdot t^{-1,3097}}}{2 + \frac{38,3872}{(H_0 - 16,3229 + \sqrt{(H_0 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_0 \cdot t^{-1,3097}})}} \quad (\text{ec.5.5})$$

5.5. Bibliografía

- Abbas, H. (1986) La productivité des forêts de Pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyses écodendrométriques. Options Méditerranéennes. Serie Etudes CIHEAM 86/I, 127-156. Abbas, H., Barbero, M., Loisel, R. y Quezel, P. (1985a) The Aleppo pine forests in Mediterranean south-eastern France. Ecodendrometric analyses. Part 1. *Foret Mediterraneenne*, 7(1), 35-42, 105, 110-112.
- Abbas, H., Barbero, M., Loisel, R. y Quezel, P. (1985b) The Aleppo pine forests in Mediterranean south-eastern France. Ecodendrometric analyses. Part 2. *Foret Mediterraneenne*, 7(2), 123-130, 198-200.
- Abelló, M.A. (1988) Historia y evolución de las repoblaciones forestales en España. Colección Tesis Doctorales, 126/88. Editorial de la Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Álvarez González, J.G., Barrio, M., Castedo Dorado, F., Diéguez-Aranda, U. y Ruiz-González, A.D. (2005a) Modelos para la gestión forestal: una revisión de las metodologías de construcción de modelos de masa. Actas das Cumunicações do 5º Congreso Florestal Português, Viséu (Portugal).
- Álvarez González, J.G., Ruíz González, A.D., Rodríguez Soalleiro, R. y Barrio, M. (2005b) Ecoregional site index models for *Pinus pinaster* in Galicia (Northwestern Spain). *Annals of Forest Science*, 62, 1-13.
- Assmann, E. (1970) The principles of forest yields study, p. 506. Pergamon Press, Oxford, New York.
- Bailey, R.L. y Clutter, J.L. (1974) Base-age polymorphic site curves. *Forest Science*, 20, 155-159.
- Barrio, M. (2003) Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, p. 252.
- Barrio, M. y Diéguez-Aranda, U. (2005) Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). *European Journal of Forest Research*, 124, 19-28.
- Barrio, M., Castedo, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G., Parresol, B.R. y Rodríguez, R. (2005) Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the GADA approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 1461-1474.
- Beck, D.E. (1971) Height growth patterns and site index of white pine in the southern Appalachians. *Forest Science*, 17, 252-260.
- Belghazi, B., Ezzahiri, M. y Romane, F. (2000) Productivity of natural stands of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller) in the Tamga forest (High Atlas, Morocco). *Cahiers Agricultures*, 9(1), 39-46.

- Bertalanffy, L.v. (1949) Problems of organic growth. *Nature*, 163, 156-158.
- Bertalanffy, L.v. (1957) Quantitative laws in metabolism and growth. *Q. Rev. Biol.*, 32, 217-231.
- Borders, B.E., Bailey, R.L., y Ware, K.D. (1984) Slash pine site index from a polymorphic model by joining (spilning) non-plynomial segments with an algebraic difference method. *Forest Science*, 30, 411-423.
- Buford, M.A. y Mackee, W.H. (1988) Relating site index of natural loblolly pine of the lower coastal plain to some environmental factors. In: *Proceedings of fifth biennial Southern Silvicultural Research Conference*, p. 495-498, Memphis, Tennessee.
- Bull, H. (1931) The use of polymorphic curves in determining site quality in young red pine plantations. *Journal of Agricultural Research*, 43 (1), 1-28.
- Calama, R., Cañadas, N. y Montero, G. (2003) Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals of Forest Science*, 60, 259-269.
- Cao, Q.V. (1993) Estimating coefficients of base-age invariant site index equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 2343-2347.
- Carmean, W.H. (1970) Tree growth patterns in relation to soil and site. In: *Tree growth and forest soils*, p. 552. Oregon State University, USA.
- Carmean, W.H. (1972) Site index curves for upland oaks in central States. *Forest Science*, 18, 109-120.
- Carmean, W.H., Hahn, J.T., y Jacobs, R.D. (1989) Site index curves for forest tree species in eastern United States. . USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-128.
- Castellani, C., Ghidini, G. y Tosi, V. (1980/82) Tavole dendrometriche ed alsometrica del pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Mill.) vevoli in Italia. *Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura* (8), 3-44.
- Cieszewski, C.J. (2000) Analytical solution to the generalized log-logistic equation. *Forest Science*, 46, 291-296.
- Cieszewski, C.J. (2001) Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 165-173.
- Cieszewski, C.J. (2002) Comparing Fixed- and Variable - Base-Age Site Equations Having Single Versus Multiple Asymptotes. *Forest Science*, 48 (1), 7-23.
- Cieszewski, C.J. (2003) Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function $Y_3 = (axm)/(c + xm-1)$, a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. *Forest Science*, 46, 116-126.

- Cieszewski, C.J. y Bailey, R.L. (2000) Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science*, 46, 116-126.
- Cieszewski, C.J., y Bella, I.E. (1989). Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 1151-1160.
- Cieszewski, C.J., Harrison, M. y Martin, S.W. (2000) Practical methods for estimating non-biased parameters in self-referencing growth and yield models. Daniel B. Warnell School of Forest Resources, University of Georgia, Athens, Georgia 30602, USA. PMRC Technical Report 2000-7.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, H.G. y Bailey, R.L. (1983) Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons. Inc. p. 329.
- Clutter, J.L., y Jones, E.P. (1980) Prediction of growth after thinning of old-field slash pine plantations. USDA Forest Service, SE-217.
- Corral Rivas, J.J., Álvarez González, J.G., Ruiz González, A.D. y Gadov, K. v. (2004) Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 201, 145-160.
- Couhert, B. y Duplat, P. (1993) Le Pin d'Alep. In *Recontre Forestiers-Chercheurs en Forêt Méditerranée*. La Grande Motte (34), 6-7 octobre 1993. Ed INRA, Les Colloques, 63:12-147.
- Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G., Barrio, M. y Rojo Alboreca, A. (2005a) Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (north-western Spain). *Annals of Forest Science*, 62, 1-10.
- Diéguez-Aranda, U., Burkhart, H.E. y Rodríguez-Soalleiro, R. (2005b) Modeling dominant height growth of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-western Spain. *Forest Ecology and Management*, 215 (1-3): 271-284.
- Elfving, B. y Kiviste, A. (1997) Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 98, 125-134.
- Erviti, J.J. (1991) Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica, Madrid. p. 319.
- Evert, F. (1971) Spacing studies review. Canadian Forest Service. Forest Management Institut Information Report. FMR-X-37.
- Fontes, L., Tomé, M., Coelho, M.B., Wright, H., Luis, J.S. y Savill, P. (2003) Modelling dominant height growth of Douglas-fir (*Pseudotsuga mensiesii* (Mirb) Franco) in Portugal. *Forestry*, 76 (5), 509-523.
- Franz, F. y Forster, H. (1980) Table de production de pin d'Alep pour les Aurès - Algeria. Chaire de la Production Forestière de l'Université de Munich.

Forschungsvonhaben in Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit, Bonn.

- Gadow, K.v. y Hui, G. (1999) Modelling Forest Development. 213 p. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- García, O. (1979) Modelling stand development with stochastic differential equations. In "Mensuration for Management Planning of Exotic Plantations", FRI Symposium N° 20, p. 315-333. D.A. Elliot (ed.), Rotorua: Forest Research Institute, New Zealand Forest Service.
- García, O. (1980) A stochastic differential equation model for the height growth of forest stands. 5th Australian Statistical Conference, p. 42 pp, Sydney.
- García, O. (1983) A Stochastic Differential Equation Model for the Height Growth of Forest Stands. *Biometrics*, 39, 1059-1072.
- García, O. (1984) New Class of Growth Models for Even-Aged Stands: *Pinus radiata* in Golden Downs Forest. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 14 (1), 65-88.
- Girardin, J.L. y Broquen, P. (1995) El crecimiento de *Pinus ponderosa* Dougl. y *Pseudotsuga menziesii* Mirb. en diferentes condiciones de sitio. *Bosque*, v. 16, n° 2, 57-67.
- Goelz, J.C.G. y Burk, T.E. (1992) Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Canadian Journal Forest Research*, 22, 776-784.
- Goelz, J.C.G. y Burk, T.E. (1996) Measurement error causes bias in site index equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1586-1593.
- Gómez Loranca, J.A., Cámara Obregón, A. y Grau Corbí, J.M. (1997) Curvas de calidad de estación para *Pinus halepensis* Mill. e idoneidades fitoclimáticas. II Congreso Forestal Español, IRATI. Pamplona.
- Gualdi, V. (1979) The productivity of even-aged stands of *Pinus halepensis* on the high plateau of Constantine in Algeria. *Italia Forestale e Montana*, 34(3), 101-120.
- Herranz, J.M. (2000) Aspectos botánicos y ecológicos del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 10, 13-17.
- Huang, S. (1997) Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework. IUFRO Congress "Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation". Pp. 61-99, Oeiras, Portugal.
- Kiviste, A.K., Álvarez, J.G., Rojo, A. y Ruiz, A.D. (2002) Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografía INIA: Forestal n° 4. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, 190.
- Lundqvist, B. (1957) On height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden. *Medd. Fran Statens Skogforsk. Band*, 47 (2), 1-64.

- Madrigal, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R. y Rojo Alboreca, A. (1999) Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Martín, M. (1947) Ensayo de investigación indirecta sobre origen, desarrollo y producciones del monte alto. IFIE, Año XVIII, nº 34, Madrid.
- McDill, M.E. y Amateis, R.L. (1992) Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. *Forest Science*, 38, 409-429.
- Monserud, R.A. (1988) Variations on a theme of site index. Proceedings IUFRO conference on forest growth modelling and prediction, 1987 August 23-27, Minneapolis, M.N. Gen. Tech. Rep. NC-120. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service; North Central Forest Experimental Station: 419-427.
- Montero, G., Grau, J.M., Ruiz-Peinado, R., Ortega, C. y Cañellas, I. (2000) Tablas de producción para *Pinus halepensis* Mill. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 10, 183-188.
- Montero, G., Cañellas, I. y Ruiz-Peinado, R. (2001) Growth and Yield Models for *Pinus halepensis* Mill. *Investigacion Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 10 (1), 180-201.
- Newberry, J.D. (1991) A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. *Forest Science*, 37 (1), 368-369.
- Ortega, A., y Montero, G. (1988) Evaluación de la calidad de estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología*, 2, 155-184.
- Palahí, M., Tomé, M., Pukkala, T., Trasobares, A. y Montero, G. (2003) Site index model for *Pinus sylvestris* in north-east Spain. *Forest Ecology and Management*, 187, 35-47.
- Panetsos, K.P. (1981) Monograph of *Pinus halepensis* (Mill.) and *P. brutia* (Ten.). *Anali za Sumarstvo*, 9(2), 39-77 + 8 pl.
- Pardé, J. (1957) La Productivité des Forêts de Pin d'Alep en France. *Annals de l'Ecole National des Eaux et Forets*, Nancy, 15.
- Parresol, B.R. y Vissage, J.S. (1998) White Pine Site Index for the Southern Forest Survey. Res. Pap. SRS-10. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 8 p.
- Pita, P.A. (1964) La calidad de la estación en las masas de *Pinus sylvestris* de la Península Ibérica. *Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*, 9, 5-28.
- Pita, P.A. (1965) Crecimiento y producción de las masas forestales españolas (Resumen de la medición de parcelas en el año 1965). *Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*, 10, 35-59.

- Pita, P.A. (1966) Clasificación provisional de las calidades de estación en las masas de pino piñonero. Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Tomo II, 171-182.
- Pita, P.A. (1967) Clasificación provisional de las calidades de estación en las masas de *Pinus pinaster* Sol. (continental) y *Pinus uncinata* Ram. de la Península Ibérica. Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, 125-138.
- Pita, J.M. (1991) Potencialidad de las estaciones forestales. Curvas de calidad. Seminario sobre Inventario y Ordenación de Montes, Unidad Temática 1, pp.18-39, Valsain (Segovia).
- Prodan, M. (1968) Punktstichprobe für die Forsteinrichtung. Forst-und Holzwirt, 23, 225-226. Frankfurt.
- Ramírez-Maldonado, H., Bailey, R.L. y Borders, B.E. (1988) Some implications of the algebraic difference approach for developing growth models. In Ek, A.R.; Shifley, S.R.; Burk, T.E. (eds). Proceedings IUFRO conference on forest growth modelling and prediction, 1987 August 23-27,, Minneapolis, MN. Gen. Tech. Rep. NC-120. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service; North Central Forest Experimental Station: 731-738.
- Richards, F.J. (1959) A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot., 10, 290-300.
- Röhle, H. (1992) Ertragstafel für die Aleppokiefer (*Pinus halepensis*) in Israel. Lehrstuhl für Waldwachstum-kunde der Universität München, 65p.
- Sas Institute Inc. (2001). SAS/STAT™ User's Guide. Release 8.2. Cary, N.C. USA.
- Schumacher, F.X. (1939) A new growth curve and its application to timber yield studies. Journal of Forestry, 37, 819-820.
- Sharma, M., Amateis, R.L., y Burkhart, H.E. (2002) Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. Forest Ecology and Management, 168, 163-175.
- Sloboda, V.B. (1971) Zur Darstellung von Wachstumprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. Mitteilungen der Badenwürttembergischen Forstlichen Versuchs und Forschungsanstalt.
- Smith, W.D. y Strub, M.R. (1991) Initial spacing: How many trees to plant. In: Forest regeneration manual. Kluwer Academic Publishers, 281-320. London.
- Souleres, G. (1975) Site-quality classes and yield of Tunisian *Pinus halepensis* forests. Revue Forestiere Francaise, 27(1), 41-49.
- Splechna, B.E. (2001) Height growth and site index models for pacific silver fir in southwestern British Columbia. B.C. Journal of Ecosystems and Management, Vol 1, number 1: 1-14.
- Tomé, M., Ribeiro, F. y Soares, P. (2001) O modelo Globulus 2.1. Universidad Técnica de Lisboa-ISA. GIMREF. 69 pp.

Vennetier, M. y Herve, J.C. (1999) Short and long term evolution of *Pinus halepensis* (Mill.) height growth in Provence (France) and its consequences for timber production. Karjalainen, T., Spiecker, H. and Laroussinie, O. EFI (European Forest Institute) Proceedings (27), 253-265.

Capítulo 6.- MODELOS DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN PARA *Pinus halepensis* EN LA DEPRESIÓN DEL EBRO

6.1. Introducción

Los sistemas forestales, que agrupan componentes físicos y biológicos, están entre los más complejos, principalmente los bosques naturales. La integración o dependencia mutua de estos componentes dificulta la comprensión del funcionamiento del sistema. Así, la planificación de la producción forestal no es una tarea fácil; aunque el cerebro humano tenga capacidad para descifrar mucho sobre el funcionamiento de las interacciones del sistema forestal, resulta difícil integrar toda la información y usarla para la gestión racional del bosque (Moscovich, 2004).

Un modelo es una herramienta útil para predecir unos resultados basados en unos datos de partida, y sirve, por lo tanto, para planificar una toma de decisiones a la vista de dichos resultados. Vanclay (1994) define un modelo como una abstracción, o una representación simplificada, de algunos aspectos de la realidad. Para Sanquetta (1996) es una representación física o abstracta de la forma o función de entidades u objetos reales.

Así, en el contexto forestal, se puede decir que un modelo de crecimiento es una abstracción de la dinámica forestal natural, abarcando crecimiento, mortalidad y otros cambios en la composición y estructura de un rodal. Generalmente se usa el término “modelo de crecimiento” para hacer referencia a un sistema de ecuaciones con una predicción de crecimiento y producción de un rodal bajo una amplia variedad de condiciones (Vanclay, 1994).

Entre la amplitud de modelos de crecimiento existentes en el campo forestal, y sus diferentes clasificaciones, se pueden distinguir los tradicionales modelos empíricos, basados en mediciones periódicas del árbol, y los complejos modelos de proceso, basados en los mecanismos que motivan el crecimiento.

Los modelos empíricos pueden no incluir la medición de todos los factores que afectan al crecimiento (Bruce y Wensel, 1988), y además no permiten comprender los mecanismos responsables del crecimiento ni hacer predicciones bajo diferentes condiciones ambientales a las de la zona estudiada (Korzukhin *et al.*, 1996), pero

presentan la ventaja de su simplicidad, por lo que son ampliamente utilizados como herramienta práctica en gestión forestal.

Dentro de los modelos empíricos se puede distinguir básicamente dos tipos, los modelos de árbol individual y los modelos agregados o de masa. Los modelos de árbol individual exigen la medición de un gran número de variables, lo que puede llevar a incluir información redundante, además de ser más dificultoso y costoso obtener todas ellas en inventarios rutinarios (García, 1994). Este tipo de modelos suelen ser necesarios para situaciones complejas, como masas irregulares, mixtas o plantaciones de ribera (García, 1993). Cuando se trata de masas regulares, generalmente se recomiendan los modelos agregados o de masa (García, 1988; 1993; Vanclay, 1994), porque pueden ser contruidos con variables básicas frecuentemente medidas en los inventarios forestales. Estos modelos caracterizan el estado de la masa mediante la medición de un pequeño número de variables asociadas, como son el área basimétrica, el diámetro medio, el volumen por hectárea, el número de pies por hectárea, el espaciamiento medio, la altura total, etc. (García, 1993). Cuando se dispone de datos de un solo inventario, que incluye un amplio rango de edades, densidades y calidades, se pueden desarrollar modelos estáticos. Por el contrario, cuando se dispone de más de un inventario en diferentes períodos de tiempo se puede desarrollar un modelo que se denomina dinámico.

Los modelos de crecimiento estáticos pueden dar buenos resultados para rodales no aclarados o para rodales sometidos a un rango reducido de tratamientos estándar, de los cuales se disponga de un gran número de datos experimentales. Los modelos dinámicos predicen fundamentalmente tasas de cambio, es decir, crecimientos de alguna variable dasométrica, que normalmente es el diámetro medio cuadrático, el área basimétrica o el volumen, bajo condiciones distintas de densidad (Diéguez-Aranda, 2004).

Dado que en este trabajo sólo se dispone de un inventario a lo largo del tiempo, sólo es posible desarrollar un modelo empírico estático.

Por otra parte, se ha optado por construir un modelo de masa, ya que este tipo de modelo representa generalmente el paso inicial a llevar a cabo cuando se pretende estudiar el desarrollo o crecimiento de una especie, siendo un buen compromiso entre generalidad (entendida como su posible aplicación a un amplio rango de situaciones) y precisión de las estimaciones (García, 1988). Además, el mejor comportamiento estadístico de las variables de masa frente a las de árbol individual es un argumento adicional para la elección de un modelo de rodal completo (Diéguez-Aranda, 2004).

Por ello, una vez obtenidos en los capítulos precedentes distintas ecuaciones que relacionan diferentes variables, tanto de árbol como de parcela, y aunque todas ellas tienen aplicación directa en la gestión forestal, se pretende en este capítulo hacer unos modelos compilatorios que permitan aglutinar todas ellas, y obtener el crecimiento y producción de la masa. De esta manera se facilita a los gestores su aplicación práctica, tal como se indicará mediante un ejemplo práctico. Se van a realizar, por tanto, un diagrama de manejo de la densidad y un modelo estático de crecimiento con desagregación por clases diamétricas.

Con el diagrama de manejo de la densidad el objetivo que se pretende es crear una herramienta de sencillo uso para la gestión y aclareo de las masas en función de su espaciamiento medio, permitiendo al gestor estimaciones rápidas, incluso en campo. Con el modelo estático de crecimiento con desagregación por clases diamétricas se plantea la obtención de datos más elaborados, permitiendo incluso la estimación de volúmenes con clasificación de productos e incluyendo las distribuciones diamétricas. Así, se consideran ambas herramientas como complementarias, la primera más ágil y rápida y la segunda más elaborada.

6.2. Diagrama de manejo de la densidad

6.2.1. Introducción

Desde el punto de vista productivo, entre las diferentes alternativas selvícolas que pueden plantearse para una masa forestal, debería escogerse aquella que permita un máximo aprovechamiento de los recursos para la estación en la que se asienta. Este máximo aprovechamiento puede conseguirse con un amplio rango de densidades, que varía entre un límite superior y otro inferior. El límite superior se corresponde con aquel nivel de densidad a partir del cual se produce la mortalidad natural por competencia. Por su parte, el límite inferior se establece cuando todos los recursos de la estación son utilizados por la masa de modo que cada uno de los árboles que la constituye asimila todo lo que su condición genética y edad le permite, es decir, cuando los individuos desarrollan su máxima capacidad de crecimiento; por debajo de esa densidad límite inferior se pierde capacidad productiva (Álvarez, 1999).

La adecuación de estos límites de densidad a un objetivo selvícola concreto es uno de los pasos más difíciles en el manejo de la densidad de una masa (Davis, 1966). Sin embargo, la densidad es uno de los pocos parámetros de masa que se pueden controlar de manera eficiente y rentable (Zeide, 2004), y además se puede utilizar para establecer

unas reglas selvícolas sencillas para su aplicación en la gestión. Así, existen diferentes índices que relacionan la densidad con alguna variable dasométrica con objeto de determinar los comentados límites superior e inferior de densidad. El índice de densidad de Reineke (Reineke, 1933) y la regla de autoaclareo de Yoda (Yoda *et al.*, 1963) son quizás los más conocidos. Pero una alternativa adecuada para establecer ambos límites son los diagramas de densidad, que predicen la evolución de la población (su volumen, altura dominante y diámetro medio cuadrático) con la densidad, para diferentes escenarios de gestión, y que se representan en un único gráfico (Newton, 1997). Estos diagramas fueron desarrollados inicialmente por Takadi (1963) y Ando (1968). Más tarde Drew y Flewing (1979) realizaron un diagrama que establecía una relación entre el logaritmo del volumen del árbol medio y el logaritmo de la densidad. Posteriormente, Long (1985) construyó un diagrama mucho más práctico, basado en la relación entre el logaritmo del diámetro medio cuadrático y el logaritmo de la densidad, es decir, basado en el índice de Reineke. La ventaja fundamental de este tipo de diagrama es que el diámetro medio cuadrático es más fácilmente estimable en el monte que el volumen, y que los índices de densidad relativos o de espaciamiento que emplean son independientes de la calidad de estación y de la edad (Barrio y Álvarez, 2005).

Según Barrio (2003), algunas de las características que presenta la aplicación práctica de estos diagramas son las siguientes:

- Permiten simular distintas alternativas de gestión, con lo que se convierten en una herramienta complementaria de las tablas de producción de selvicultura media observada, que son más rígidas, y de esta forma el técnico puede fijar una meta productiva y seleccionar las combinaciones de espaciamiento inicial de la masa y las claras que permitirán alcanzar ese objetivo (Cameron, 1988; Chauchard, 2001).
- Permiten el desarrollo rápido de esquemas de claras en un amplio rango de calidades de estación y de objetivos de manejo o gestión (Dean y Baldwing, 1993).
- Proporcionan información adicional sobre el volumen de la masa y sobre su diámetro medio cuadrático, con lo que se pueden obtener sus valores antes y después de una clara.
- Son sencillos de aplicar y requieren variables de entrada que son fáciles de obtener en campo.

Así, en este subcapítulo se va a elaborar un diagrama de densidad, con el objeto de establecer una herramienta para la gestión de las masas de pino carrasco estudiadas, en función de su espaciamiento medio.

Este tipo de diagramas se han elaborado a nivel internacional para diferentes especies (Drew y Flewelling, 1979; Flewelling *et al.*, 1980; McCarter y Long, 1986; Long *et al.*,

1988; Dean y Jokela, 1992; Dean y Baldwin, 1993; Newton y Weetman, 1993; Archibald y Bowling, 1995). En Europa se han realizado para *Quercus robur* en Francia (Duplat, 1996) y en Alemania (Kenk, 1980), basados en ambos casos en el índice de Hart-Becking. En el caso de España, existen trabajos de este tipo para:

- *Quercus robur* en Galicia, empleando ambos índices, el de Reineke y el de Hart-Becking (Barrio, 2003).
- *Pinus halepensis* en la zona catalana interior y aragonesa, empleando el índice de Reineke (Valbuena *et al.*, 2008).
- *Pinus pinaster* en el Sistema Ibérico entre Teruel y Cuenca, empleando el índice de Reineke (Valbuena *et al.*, 2008).
- *Pinus pinaster* en Galicia, empleando el índice de Hart-Becking (Barrio *et al.*, 2006).
- *Quercus pyrenaica* en el Sistema Central, empleando el índice de Reineke (Herrero, 2005).
- *Pinus nigra* en la Península Ibérica, empleando el índice de Reineke (Valbuena, 2005).

El diagrama de manejo de densidad para *Pinus halepensis* en la zona catalana interior y aragonesa (Valbuena *et al.*, 2008) se basa en el índice de Reineke y contempla un límite superior e inferior de densidad. Con el objeto de valorar la adecuación de ese diagrama para la zona de estudio en esta tesis, así como el grado de espesura de los datos empleados, se han representado la densidad y el diámetro medio cuadrático de cada una de las parcelas utilizadas en esta tesis sobre dicho diagrama (Figura 6.1).

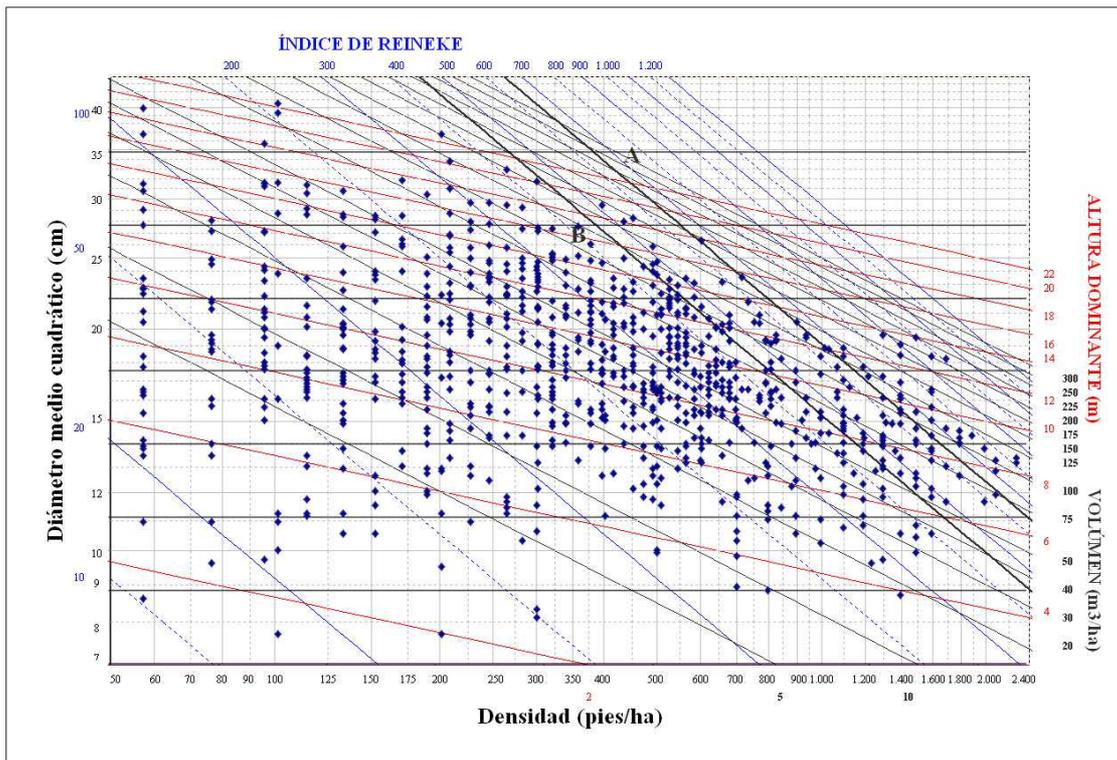


Figura 6.1. Datos del inventario de esta tesis frente al diagrama de manejo de densidad para pino carrasco en la zona catalana interior y aragonesa (Valbuena *et al.*, 2008).

Como se puede observar en la Figura 6.1, la mayor parte de las parcelas se encuentran a la izquierda de la línea B, que representa el límite inferior de densidad (valor del 35% del índice de Reineke máximo) del diagrama de Valbuena *et al.* (2008), por debajo del cual teóricamente no hay ocupación total del espacio. Por tanto, desde el punto de vista productivo, la mayor parte de las parcelas tendrían una espesura defectiva, por lo que no serían necesarias las intervenciones selvícolas de reducción de la densidad. Se ha considerado, entonces, que no es suficiente ese diagrama para el planteamiento de las intervenciones selvícolas en este tipo de masas, pues resulta necesario aumentar la flexibilidad en la decisión selvícola, permitiendo un amplio rango del índice de densidad.

Finalmente, se ha optado por utilizar como índice de densidad el índice de Hart-Becking (*IH*). A diferencia del diagrama basado en el índice de Reineke, el que utiliza el de Hart-Becking presenta las siguientes características (Barrio, 2003):

- El índice de Hart-Becking es muy utilizado en Europa para valorar tanto la necesidad como el peso y rotación de las claras.
- Depende de la altura dominante, lo cual tiene un significado biológico, ya que el crecimiento en altura dominante es el criterio que debe marcar la rotación entre dos claras consecutivas.

- No establece umbrales de densidad máximo y mínimo de una masa considerada en un estado selvícola racional, permitiendo al gestor forestal establecer los límites de densidad que crea oportunos sin más que limitar el esquema de claras a la franja definida por los dos valores del índice de Hart-Becking considerados adecuados. Para ello, se representa gráficamente la evolución de un amplio rango de valores del índice de Hart-Becking en el diagrama cartesiano que enfrenta la densidad con la altura dominante.

La aplicación del índice de Hart a la gestión de las masas de pino carrasco ha sido muy poco frecuente (Erviti, 1991), aunque sí lo hicieron Fernández y Madrigal (1977) y el propio Erviti (1991).

6.2.2. Material y Métodos

6.2.2.1. Datos empleados

Los datos empleados para la construcción de los diagramas de densidad son los procedentes del inventario realizado en 924 parcelas distribuidas por las zonas de Zuera y Alcubierre, explicado en el capítulo de Introducción.

En la Tabla 6.1 se presentan los estadísticos descriptivos, para todo el conjunto de parcelas empleadas, de las variables de masa habitualmente incluidas en los diagramas de manejo de la densidad, donde N es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), H_0 la altura dominante (en m), V el volumen con corteza (en m^3/ha), t la edad (en años) e IH el índice de Hart-Becking (en porcentaje). Como ya se ha comentado anteriormente, se observa una gran dispersión de los valores representativos, signo inequívoco de una gran diversidad de estados selvícolas. Por ejemplo, los valores del índice de Hart-Becking (IH) oscilan entre el 19 y el 990%, correspondiendo el valor medio a casi 118%, cifra muy elevada y que corrobora la defectiva cobertura en gran parte de la masa.

Tabla 6.1. Estadísticos descriptivos de los datos de todas las parcelas.

Estadístico	N (pies/ha)	d_g (cm)	H_0 (m)	V (m^3/ha)	t (años)	IH
Máximo	2.800,00	40,70	15,93	207,68	124,00	990,41
Mínimo	18,83	7,32	2,50	0,27	25,00	19,59
Media	484,81	18,09	7,50	45,26	58,09	117,88
Desviación estándar	446,72	5,35	2,30	36,57	15,35	125,05
Coef. de variación (%)	92	30	31	81	26	106

Dada entonces la gran variabilidad que presenta la densidad de estas masas, y teniendo en cuenta que la obtención de relaciones estadísticas adecuadas entre variables requiere cierta homogeneidad en los estados selvícolas, se ha analizado la posibilidad de estratificar las masas en función de algún índice de espesura. Para ello se han elaborado gráficos de dispersión que enfrentan la densidad (N) con la edad (t) y la altura dominante (H_0), y también el índice de Hart-Becking con la edad (Figura 6.2).

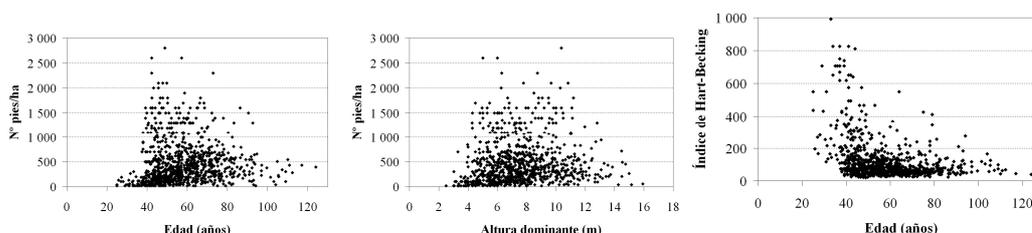


Figura 6.2. Gráficos de la densidad frente a la edad y altura dominante, y del índice de Hart-Becking frente a la edad.

Como se puede observar en la Figura 6.2, no existen unos límites claros que permitan una fácil estratificación de las masas. Sin embargo, se ha considerado conveniente discriminar la masa en dos grupos que permitan reducir dicha heterogeneidad, y calcular los diagramas de gestión solamente para aquel grupo en el que el conjunto de datos permita el establecimiento de unas relaciones entre las variables significativamente válidas desde un punto de vista estadístico. Se ha encontrado que esto ocurre para aquellas zonas con valor del índice de Hart-Becking inferior o igual a 70. Sin embargo, para las masas densas de las parcelas de producción que estudió Erviti (1991) el índice de Hart (en malla cuadrada o marco real, y en %) tomaba valores comprendidos entre 20 y 60, valor éste último no muy alejado del seleccionado en esta tesis. Igualmente, en las claras por lo bajo que se hicieron en las parcelas establecidas por el antiguo Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE), la espesura se acomodó a valores del índice de Hart que variaban de 39,9 a 59,5 %, según las diferentes calidades que estableció Pita (Fernández y Madrigal, 1977).

Así, de las 924 parcelas iniciales, 404, es decir un 44% de las mismas, poseen un índice de Hart-Becking inferior o igual a 70. En la Tabla 6.2 se presentan los estadísticos descriptivos de esas 404 parcelas seleccionadas finalmente para la representación del diagrama (con índice de Hart-Becking inferior o igual a 70), y en la Tabla 6.3 los correspondientes al resto de parcelas, con valor del índice de Hart-Becking superior a 70. Donde N es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), H_0 la altura dominante (en m), V el volumen con corteza (en m^3/ha), t la edad (en años) e IH el índice de Hart-Becking (en porcentaje).

Tabla 6.2. Estadísticos descriptivos de los datos de las 404 parcelas empleadas para la realización del diagrama de manejo de la densidad con índice de Hart-Becking inferior o igual a 70.

Estadístico	N (pies/ha)	d_g (cm)	H_0 (m)	V (m ³ /ha)	t (años)	IH(%)
Máximo	2.800,00	36,56	14,99	207,68	124,00	69,86
Mínimo	169,51	8,56	4,27	16,23	37,90	19,59
Media	790,19	18,23	8,75	74,62	62,12	50,53
Desviación estándar	473,72	4,62	2,08	32,48	14,44	11,92
Coef. de variación (%)	60	25	24	44	23	24

Tabla 6.3. Estadísticos descriptivos de los datos de las parcelas con índice de Hart-Becking superior a 70 (no utilizadas para la construcción del diagrama de manejo de la densidad).

Estadístico	N (pies/ha)	d_g (cm)	H_0 (m)	V (m ³ /ha)	t (años)	IH(%)
Máximo	1.200,00	40,70	15,93	100,68	109,00	990,41
Mínimo	18,83	7,32	2,50	0,27	25,00	70,66
Media	228,10	17,96	6,44	20,57	54,70	174,50
Desviación estándar	186,34	5,90	1,91	15,51	15,29	147,17
Coef. de variación (%)	82	33	30	75	28	84

6.2.2.2. Metodología de construcción del diagrama de manejo de la densidad

Para la construcción de este diagrama se ha seguido la metodología propuesta por Barrio (2003) y Barrio y Álvarez (2005) para *Quercus robur* en Galicia, aplicada también por García (2005) para *Quercus pyrenaica* en el Parque Natural de Montesinho (Portugal). Los pasos a seguir son los siguientes:

En primer lugar se establecen unos ejes de coordenadas, en los cuales se representan en el eje de abscisas los valores de altura dominante (m) y en el eje de ordenadas los valores de densidad, expresada en número de pies por hectárea y en escala logarítmica. En este caso, la escala de alturas dominantes ha variado entre 4 y 20 metros y el número de pies entre 50 y 3.000 por hectárea.

En segundo lugar se dibujan las curvas correspondientes a diferentes valores del índice de Hart-Becking, calculado según se indica en el capítulo de Introducción. Los valores de este índice, utilizados en esta tesis para la realización del diagrama, han variado entre el 18 y el 70%. De este modo, fijado un valor del índice de Hart-Becking se sustituyen las alturas dominantes del eje de abscisas y se van obteniendo los valores de densidad correspondientes de acuerdo con la expresión (ec. 6.1), calculada despejando N de la ecuación del índice de Hart-Becking:

$$N = \frac{20.000 \cdot 100^2}{\sqrt{3} \cdot IH^2 \cdot H_0^2} \quad (\text{ec.6.1})$$

En tercer lugar se realiza el ajuste simultáneo de dos ecuaciones básicas: la primera relaciona el diámetro medio cuadrático con la densidad y la altura dominante, y la segunda el volumen de la masa con el diámetro medio cuadrático, la altura dominante y la densidad. De este modo se pueden incluir nuevas curvas en el diagrama, que permiten estimar diámetros medios cuadráticos y volúmenes de masa. El sistema de dos ecuaciones es el formado por las relaciones (6.2) y (6.3):

$$d_g = \beta_0 \cdot N^{\beta_1} \cdot H_0^{\beta_2} \quad (\text{ec.6.2})$$

$$V_m = \beta_3 \cdot d_g^{\beta_4} \cdot H_0^{\beta_5} \cdot N^{\beta_6} \quad (\text{ec.6.3})$$

La ecuación (ec.6.2) se basa en la relación entre el tamaño del árbol, la densidad y un indicador de la productividad, e incluye las mismas variables independientes utilizadas por Goulding (1972) para estimar el diámetro medio cuadrático en repoblaciones de abeto de Douglas. La ecuación (ec.6.3) proporciona una estimación de la productividad de la parcela en volumen basada en relacionar el volumen de masa con el volumen del árbol medio (dado por el diámetro medio cuadrático y la altura dominante) y el número de pies por hectárea (Barrio *et al.*, 2006).

Dado que las ecuaciones (ec.6.2) y (ec.6.3) forman un sistema relacionado, el ajuste se puede efectuar mediante el empleo del método de máxima verosimilitud con información completa (FIML), con el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS (SAS Institute Inc., 2001). Este método permite resolver los sistemas de ecuaciones simultáneos y no recursivos, y a diferencia de otros métodos instrumentales, que usan en la estimación de las variables endógenas sólo una proporción del modelo (variables exógenas), éste emplea todo el modelo en la estimación, aunque en ocasiones resulta complicado obtener la convergencia en dicha estimación.

Una vez ajustadas estas dos ecuaciones se obtienen las curvas de diámetro medio cuadrático, estableciendo previamente un rango para esta variable (en este caso, entre 10 y 36 cm, de acuerdo con el máximo y mínimo valor observado en las parcelas). De este modo, fijado un valor del diámetro medio cuadrático, las ordenadas de la curva correspondientes a dicho diámetro medio cuadrático se calculan sustituyendo en la ecuación (ec.6.2) los valores de altura dominante del eje de abscisas, es decir:

$$N = \left(\frac{d_g}{\beta_0 \cdot H_0^{\beta_2}} \right)^{\frac{1}{\beta_1}} \quad (\text{ec.6.4})$$

Seguidamente se obtienen las curvas del volumen de la masa siguiendo el mismo procedimiento anterior. En este caso, y de acuerdo con el valor máximo y mínimo observados en las parcelas, se ha fijado un intervalo para esta variable entre 20 y 230 m³/ha. Las ordenadas de cada curva se calculan sustituyendo en la ecuación (ec.6.3) el valor del diámetro medio cuadrático obtenido en la ecuación (ec.6.2), y despejando la densidad en función del volumen de la masa fijado para esa curva y los valores de altura dominante del eje de abscisas, es decir:

$$N = \left(\frac{V_m}{(\beta_3 \cdot \beta_0^{\beta_4}) \cdot H_0^{(\beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_5)}} \right)^{\frac{1}{(\beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_6)}} \quad (\text{ec.6.5})$$

6.2.3. Resultados y discusión

Como ya se ha comentado, para la construcción del diagrama de manejo de la densidad ha sido conveniente la discriminación de la masa en dos conjuntos de datos, con objeto de obtener conjuntos de datos más homogéneos y relaciones estadísticas entre las variables más satisfactorias. Se han diferenciado dos conjuntos de datos, distinguiendo las parcelas con valor del índice de Hart-Becking superior a 70 y aquellas que presentaban un valor inferior. Así, por ejemplo, se ha pasado de un valor de R^2_{Adj} para la ecuación que relaciona el diámetro medio cuadrático con otras variables (ec.6.2) de 0,633 a 0,766, según se realicen los ajustes para el conjunto total de los datos o solamente para el conjunto de datos con índice de Hart-Becking inferior a 70. De igual forma, el valor del EMC se ha reducido prácticamente a la mitad. Se han reducido también los coeficientes de variación de las variables de parcela, sobre todo para el grupo de datos con IH inferior a 70. Todo esto confirma el interés de separar los datos y la construcción del diagrama exclusivamente para las parcelas con un $IH \leq 70$.

En la Tabla 6.4 se presentan los resultados del análisis de la varianza del ajuste simultáneo de las dos ecuaciones (ec.6.2) y (ec.6.3), y en la Tabla 6.5 el resultado de la estimación de los parámetros, su error estándar, el contraste de hipótesis y el test de significación de los mismos.

Tabla 6.4. Tabla resumen de los errores de los residuos para el ajuste simultáneo de las ecuaciones (ec.6.2) y (ec.6.3) para parcelas con un $IH \leq 70$.

Ecuación	Grados de libertad de los modelos	Grados de libertad del error	Suma de cuadrados	EMC	REMC	R^2_{Adj}
d_g	3	419	2033,2	4,8526	2,2029	0,7726
V_m	4	418	3950,8	9,4516	3,0744	0,9910

Tabla 6.5. Parámetros estimados en el ajuste simultáneo de las ecuaciones (ec.6.2) y (ec.6.3) para parcelas con un $IH \leq 70$.

Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	T para H_0 Parámetro=0	Prob> T asintótico
β_0	29,9668	4,1644	7,20	<,0001
β_1	-0,2363	0,0126	-18,69	<,0001
β_2	0,4743	0,0328	14,47	<,0001
β_3	0,0001	0,0000	8,29	<,0001
β_4	2,1377	0,0327	65,37	<,0001
β_5	0,5914	0,0160	36,88	<,0001
β_6	1,0149	0,0087	118,66	<,0001

Puede observarse que los resultados de los ajustes son buenos, con valores de los estadísticos aceptables, y que todos los valores de las estimaciones de los parámetros son significativamente diferentes de cero.

Por último, en la Figura 6.3 se representa el diagrama de manejo de la densidad para *Pinus halepensis* en la zona estudiada, basado en el índice de Hart-Becking (IH). En este diagrama, entrando con la densidad y la altura dominante de una parcela, se pueden obtener como variables de salida el volumen, el diámetro medio cuadrático y el índice de Hart-Becking de la masa en cualquier momento de su desarrollo y en función del esquema selvícola escogido. Aunque estas son quizás las variables de entrada más lógicas, se puede entrar con cualquier otra combinación de dos de las variables contempladas en el diagrama.

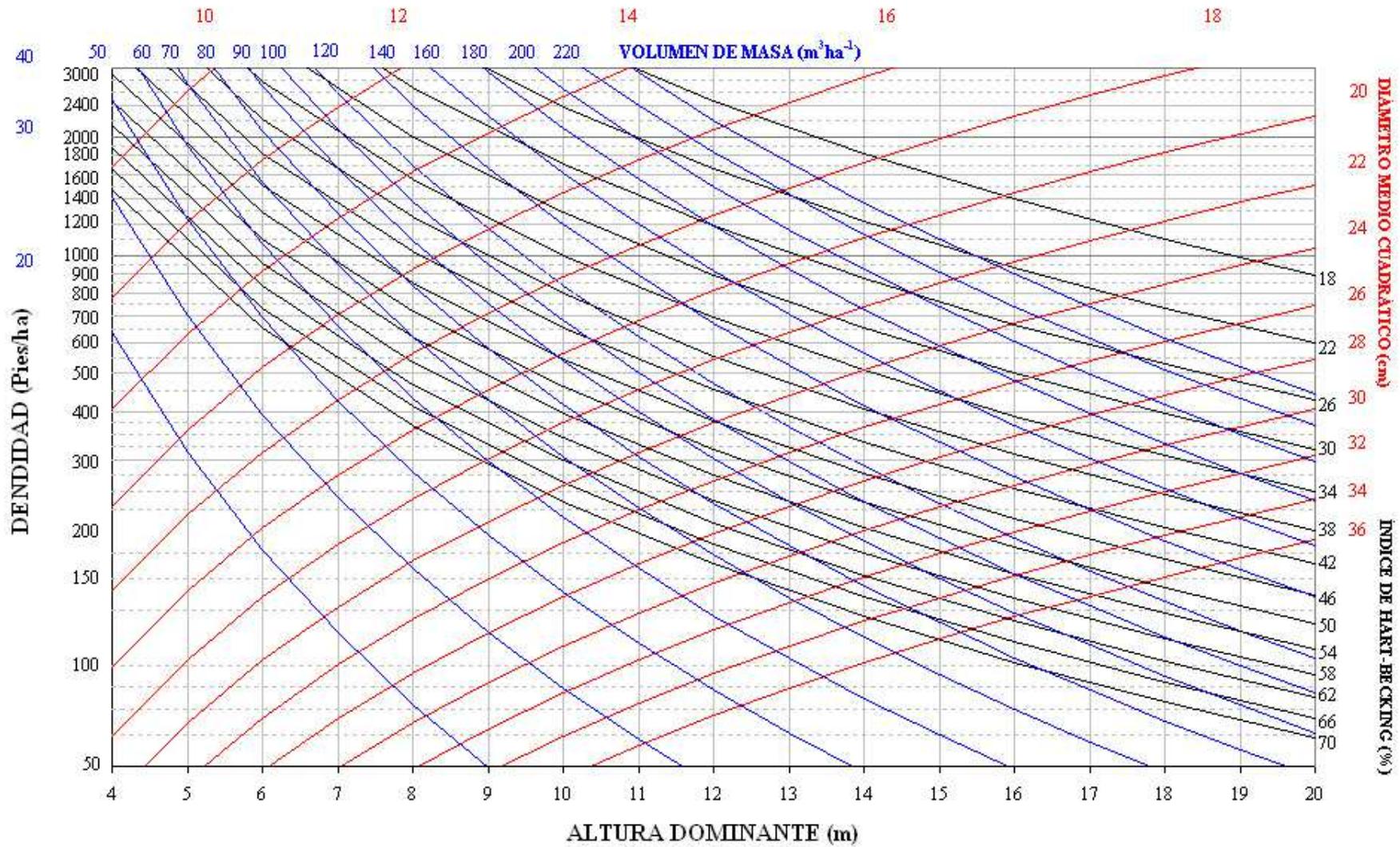


Figura 6.3. Diagrama de manejo de la densidad, basado en el índice de Hart-Becking, para las masas naturales de *Pinus halepensis* en la depresión del Ebro.

En la Tabla 6.6 se presenta una comparación de los valores medios de las variables de masa empleadas para construir el diagrama de manejo de la densidad (denominado en la tabla Diagrama *IH*) con otros mostrados en otros trabajos existentes para pino carrasco, como son el diagrama de Valbuena *et al.* (2008), las tablas de producción de Montero *et al.* (2001), de Franz y Forster (1980), de Couhert y Duplant (1993) y de Ciancio (1986). Como se puede observar, las diferentes variables presentan valores bastante próximos, a excepción del valor máximo de densidad de las tablas de producción de Couhert y Duplant (1993).

Tabla 6.6. Comparación entre el rango de valores de las variables de masa utilizadas en la construcción del diagrama de manejo de la densidad de esta tesis con los obtenidos en otros trabajos de selvicultura de *Pinus halepensis*.

Variable	Estadístico	Diagrama <i>IH</i>	Diagrama Valbuena <i>et al.</i> (2008)	Tablas Montero <i>et al.</i> (2001)	Tablas Franz y Forster (1980)	Tablas Cohuert y Duplant (1993)	Tablas Ciancio (1986)
<i>N</i> (pies/ha)	Máximo	3.000	2.400	2.103	2.409	15.000	2.222
	Mínimo	50	50	175	83	200	400
<i>d_g</i> (cm)	Máximo	36	44	37	57,1	--	--
	Mínimo	10	7	5,9	1,6	--	--
<i>H₀</i> (m)	Máximo	20	22	23	22,8	20,9	--
	Mínimo	4	4	4,5	2,9	2,6	--
<i>V</i> (m ³ /ha)	Máximo	230	300	257	180	--	300
	Mínimo	20	2	12,9	0	--	100
<i>IH</i>	Máximo	70	--	51	101	--	--
	Mínimo	18	--	32	37	--	--
<i>t</i> (años)		--	--	120	160	60	40

donde *N* es el número de pies por hectárea, *d_g* el diámetro medio cuadrático (en cm), *H₀* la altura dominante (en m), *V* el volumen con corteza (en m³/ha), *IH* el índice de Hart-Becking (en porcentaje) y *t* la edad (en años).

Respecto del índice de Hart-Becking, Vigneron (1988) propone las claras para esta especie cuando este índice alcanza valores inferiores al 30%, y aconseja llevarlo a valores alrededor del 35%. También Serrada (1992) indica como espesura normal para las masas regulares de esta especie valores de este índice alrededor del 35%.

6.2.4. Aplicación del diagrama de manejo de la densidad. Ejemplos prácticos

De acuerdo con lo expuesto previamente, con los aspectos selvícolas de esta especie (comentados en el capítulo de Introducción), y teniendo en cuenta los trabajos sobre crecimiento y producción de la especie, tanto en España (Montero *et al.*, 2001; Valbuena *et al.*, 2008) como en otros países del área de distribución de la especie como Italia (Castellani *et al.*, 1980/82; Ciancio, 1986), Francia (Abbas, 1986; Bedel, 1986; Couhert y Duplat, 1993), Argelia (Franz y Forster, 1980), Túnez (Chakroun, 1986), Yugoslavia (Klepac, 1986), así como algunas experiencias selvícolas en diferentes regiones españolas (Alejano *et al.*, 2000; González, 2000; González y Cabezas, 2000; Valero, 2000), se considera necesario clasificar la masa de acuerdo a su capacidad productiva, utilizando para ello el índice de sitio.

Para tener una idea de la estructura actual de la masa, en la Figura 6.4 se ha representado la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas utilizadas, superpuesta sobre el diagrama de gestión. Puede observarse que más del cincuenta por ciento de las parcelas presentan un valor del índice de Hart-Becking superior a 70, valor alto y que indica el gran espaciamiento entre pies existente en las masas.

Es destacable el hecho de que la mayoría de estas parcelas pertenecen a la clase de peor calidad de estación (clase de calidad III), siendo pocas las parcelas que presentan buena calidad de estación (clase de calidad I).

Para las parcelas de baja espesura situadas en malas calidades de estación no se recomienda efectuar tratamientos de clara. En estas condiciones los árboles no compiten entre ellos, pero no aprovechan al máximo la capacidad de la estación o bien la calidad de ésta no permite el mantenimiento de un arbolado en espesura completa.

Como se puede observar en los estadísticos descriptivos, según clases de calidades de estación (Tablas 6.8, 6.11 y 6.14), los valores de densidad o de índice de Hart-Becking de las masas indican muy baja espesura para esas parcelas; por tanto, se recomienda dejar crecer el arbolado hasta final de turno sin operaciones intermedias de reducción de la densidad en la tipología de parcelas con índice de Hart-Becking mayor de 70.

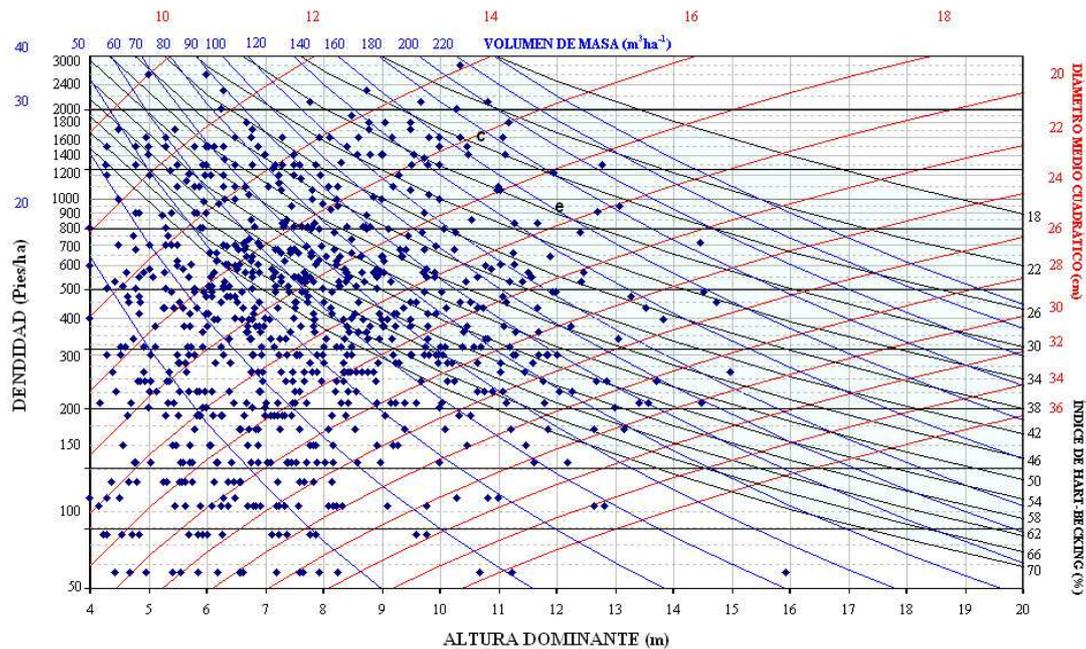


Figura 6.4. Diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas.

Por otra parte, las parcelas que presentan un valor del índice de Hart-Becking inferior a 70 se han clasificado según las tres clases calidad de estación establecidas en el Capítulo 5: clase de calidad I ($IS=14$), clase de calidad II ($IS=10$) y clase de calidad III ($IS=6$).

No se considera práctico el establecimiento de una propuesta selvícola general para estas masas ya que no se encuentran ordenadas, sino que se hace necesario realizar propuestas concretas para el estado actual en que se encuentra cada uno de los rodales, que permitan su ordenación en el futuro. Por eso se plantean, en los apartados siguientes, unos ejemplos concretos de programas de claras, partiendo de algún rodal real existente en la masa, según clases de calidad. Dada la gran heterogeneidad existente en densidades y altura dominante para una misma edad, se considera más práctico la aplicación del diagrama, por parte del gestor forestal, a cada tipología de rodal y a cada objetivo que se fije de acuerdo a las posibilidades del mercado, actuales y futuras, así como a los demás objetivos comentados en el capítulo de Introducción.

Debe tenerse en cuenta que se trata de esquemas selvícolas para el tratamiento de la masa en su estado actual, sometida a intervenciones selvícolas erráticas y no programadas en planes de gestión. También es necesario recordar que no se ha incluido en el inventario, ni se ha considerado, la zona en regeneración tras el incendio de 1995.

Desde un punto de vista económico y administrativo, la posibilidad de cortas frecuentes no es muy viable en este tipo de montes de baja productividad, salvo un futuro cambio en el mercado, por lo que en estos ejemplos se ha tratado de reducir el número de intervenciones y aumentar la intensidad de corta, teniendo en cuenta además la edad actual en la que se encuentran. No obstante, debe considerarse la posibilidad de que se produzca un exceso de rebrote de matorral, sobre todo de coscoja (*Quercus coccifera* L.), por la puesta en luz intensa, lo cual no es recomendable.

Las tablas de producción existentes para la especie en distintos países son tablas de selvicultura media, representando la evolución natural de densidad para distintas calidades de estación. Los esquemas selvícolas propuestos, como ejemplos, pueden acelerar las pautas naturales observadas, ya que son esquemas orientados a la producción y no tienen porqué parecerse a las reducciones de densidad de las tablas de producción. Sin embargo, se tratará de enmarcar lo propuesto en los ejemplos con lo previsto en algunas tablas de producción o esquemas selvícolas. Se van a considerar las españolas de Montero *et al.* (2001), las argelinas de Franz y Forster (1980) propuestas para la selvicultura española hasta la realización de las de Montero *et al.* (2001), las de la Provenza francesa de Couhert y Duplant (1993) y las italianas de Castellani *et al.* (1980-82). No se comparan con otras como las israelíes (Röhle, 1992) porque sólo están construidas hasta la edad de 60 años o las italianas de Ciancio (1986) hasta los 40 años. También se va a analizar su encuadre dentro de los modelos propuestos para Cataluña (Llobet, 2008).

Ejemplo 1: Esquema selvícola para masas de la clase de calidad I, IS=14

De las 32 parcelas que presentan Calidad I en los dos montes objeto de estudio, 26 de ellas (el 81,3%) tienen un *IH* menor o igual a 70 (todas las incluidas en la zona de Alcubierre con calidad I, excepto una, pertenecen a este grupo). En la Tabla 6.7 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de estas parcelas, y en la Tabla 6.8, a modo de comparación, los estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de las parcelas de esta calidad I y con *IH* mayor de 70. Donde *N* es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), H_0 la altura dominante (en m), \bar{d} el diámetro medio aritmético (en cm), *t* la edad (en años) e *IH* el índice de Hart-Becking (en porcentaje). En la Figura 6.6 se representa el diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas con Calidad I.

Tabla 6.7. Estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de las parcelas con Calidad I e IH menor o igual a 70.

Estadístico	N (pies/ha)	dg (cm)	H ₀ (m)	\bar{d} (cm)	t (años)	IH(%)
Máximo	2.100	32,83	14,99	31,88	77,00	58,24
Mínimo	207,18	11,71	9,50	11,41	42,40	21,66
Media	760,28	21,23	12,34	20,25	54,49	38,68
Desviación estándar	614,48	5,56	1,56	5,36	11,07	11,99
Coef. de variación (%)	81	26	13	26	20	31

Tabla 6.8. Estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de las parcelas con Calidad I e IH mayor a 70.

Estadístico	N (pies/ha)	dg (cm)	H ₀ (m)	\bar{d} (cm)	t (años)	IH(%)
Máximo	207,18	40,70	15,93	40,58	82,00	122,86
Mínimo	37,67	13,59	8,04	13,58	30,80	79,34
Media	94,17	27,39	12,21	26,92	51,58	101,69
Desviación estándar	66,32	11,83	3,11	12,21	18,20	18,65
Coef. de variación (%)	70	43	25	45	35	18

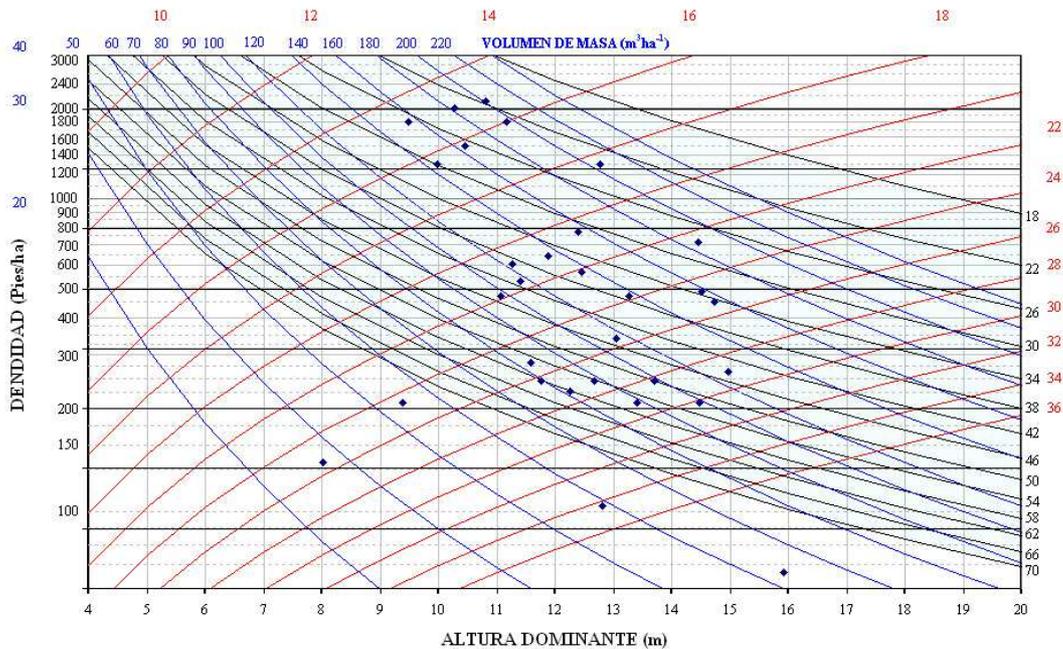


Figura 6.6. Diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas de Calidad I.

En la Figura 6.7 se presentan el diagrama de manejo de la densidad y, superpuesto sobre el mismo, el programa de claras propuesto como ejemplo para un rodal incluido en este grupo de calidad (en color verde). En la Tabla 6.9 se presentan los valores numéricos de las principales variables de masa antes y después de clara correspondientes al programa de claras propuesto, y que han sido obtenidos a partir de las ecuaciones que dieron origen al diagrama de de manejo de la densidad.

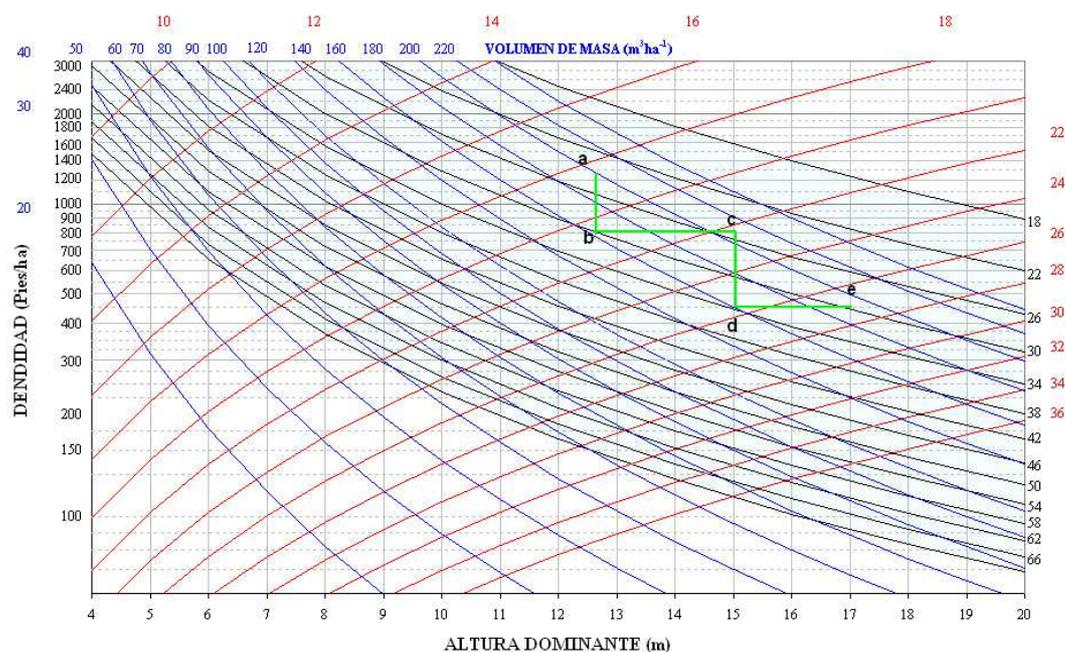


Figura 6.7. Diagrama de manejo de la densidad superpuesto con el programa de claras para una situación actual de Calidad I (en color verde).

El régimen selvícola propuesto en este ejemplo plantea alcanzar un crecimiento en altura dominante entre 2-3 metros para rotaciones entre las intervenciones de aproximadamente 20 años, con una meta final próxima a 17 metros de altura dominante, con valores del índice de Hart-Becking dentro de rangos admisibles.

Tabla 6.9. Valores de las principales variables de masa antes (AC) y después de clara (DC) para el programa de claras propuesto para una situación actual de Calidad I en la Figura 6.7.

Operación	H_0 (m)	N (pies ha ⁻¹)		d_g (cm)		V (m ³ ha ⁻¹)		G (m ² ha ⁻¹)		IH (%)		t (años)
		AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	
Clara (a-b)	12,8	1.300	800	18,5	20,7	186,04	145,25	34,76	26,91	23,3	29,7	47
Clara (c-d)	15	800	450	22,3	25,6	187,36	139,73	31,27	23,09	25,3	33,8	70
Corta final (e)	17	450	-	27,1	-	170,83	-	26,00	-	29,8	-	92

donde H_0 es la altura dominante (en m), N es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), V el volumen con corteza (en m³/ha), G el área basimétrica (en m²/ha), IH el índice de Hart-Becking (en porcentaje) y t la edad (en años). AC y DC indican los valores de las variables antes y después de la clara.

El programa de claras propuesto en el ejemplo presenta un peso alto con extracciones en área basimétrica del 22,59% y 26,17% en la primera y segunda intervención,

respectivamente (valores también muy similares si se refiere al volumen). Obviamente estos pesos son muy superiores a los previstos en las diferentes tablas comentadas, ya que por una parte, y como ya se ha dicho, se parte de una situación de densidades muy por encima de las que le correspondería por la edad, al no haberse realizado intervenciones selvícolas en edades más tempranas, y por otra parte se plantean intervenciones menos frecuentes (por problemas económicos) a las teóricamente planteadas en las diferentes tablas (entre 5 y 10 años, según autores). Son también algo superiores al 20% propuesto por Serrada (1992) en masas protectoras para garantizar la protección del suelo, aconsejando claras moderadas y frecuentes, pero también indica que con frecuencia las rotaciones se alargan por motivos presupuestarios, que no permiten aplicar más de 2-3 intervenciones a lo largo del turno.

El índice de Hart-Becking después de las claras varía entre 29,7 y 33,8, valores que se encuentran dentro de los rangos utilizados por otros autores en sus tablas de producción (p.e. Franz y Forster, 1980; Montero *et al.*, 2001) o indicados por otros autores (Vigneron, 1988; Serrada, 1992), ya comentado en el apartado anterior (6.2.3.).

Si se consideran las tablas de producción propuestas por Montero *et al.* (2001) este ejemplo se encontraría enmarcado entre la calidad 17 y 14 definidas por estos autores, más cerca de la 17 si se compara también la edad prevista para la corta final. Sin embargo, se parte de densidades incluso superiores a las iniciales de la tabla a la edad de 20 años, y casi iguales a las previstas en la calidad 11 para una edad similar. De ahí la dificultad de aplicar las tablas con las intensidades de clara propuestas. La densidad prevista en las tablas a los 90 años varía entre 412 y 362 pies/ha, para la calidad 17 según se trate de un régimen moderado o fuerte de claras. Se puede observar que no son valores tan alejados de lo planteado en el ejemplo si se considera que éste se encuentra un poco por debajo en calidad. Por ello también se encuentran algo por debajo los valores de dg , G y V (32,8 cm, 30,5 m²/ha y 198,7 m³/ha, respectivamente).

Respecto a las tablas de producción propuestas por Franz y Forster (1980) si se observa sólo el estado inicial de la masa, el ejemplo de esta tesis parece encuadrar en la calidad 20 propuesta por estos autores; sin embargo, si se mira también la altura dominante alcanzada a los 70 y 90 años encuadra mucho mejor en la calidad 18. También en este caso se parte de densidades superiores a las previstas en este caso, incluso a la edad de 30 años. La densidad prevista por estos autores a los 90 años es de 225 pies/ha, para la calidad 18, la mitad que en el ejemplo. En este caso el valor de dg (34 cm) se encuentra bastante por encima del valor del ejemplo, pero no así los de G y V (20,4 m²/ha y 131 m³/ha, respectivamente) que se encuentran por debajo.

Fijándose en las tablas de producción propuestas por Castellani *et al.* (1980-82), comparando como en los casos anteriores, el ejemplo de esta tesis estaría encuadrado

entre la calidad III y la IV de estos autores, y más cercana a la III si se tiene en cuenta la altura dominante a los 70 años, edad de finalización de estas tablas. También en este caso se parte de densidades superiores a las previstas en la tabla a la edad de 25 años. La densidad final prevista a los 70 años es de 780 pies/ha, muy por encima de la considerada en el ejemplo. En este caso, el valor de d_g (22,8 cm) se encuentra por debajo del valor del ejemplo, pero no así los de G y V (31,8 m²/ha y 202 m³/ha, respectivamente) que se encuentran por encima, justo al contrario que en el caso argelino y similar al de Montero *et al.* (2001).

En cuanto a las tablas de Couhert y Duplat (1993), realizadas sólo para tres de las ocho calidades que establecieron (8, 12 y 16 metros de altura dominante a la edad de 50 años), se acercaría más a la calidad 12, superándola un poco, tal y como puede observarse en los valores que adquieren las diferentes variables de masa. En este caso coincide bastante el turno de corta establecido.

El modelo de Llobet (2008) para calidad I (con altura dominante a los 80 años de 17 m), y aprovechamiento de la madera para sierra, propone turnos de 60-70 años, con una densidad a esta edad de 400-500 pies/ha. Esto concuerda en densidad con el ejemplo de esta tesis, aunque el turno se alarga sobre 20 años más, lo cual es necesario dado que la calidad parece algo menor que la de las masas catalanas.

Ejemplo 2: Esquema selvícola para masas de la clase de calidad II, IS=10

Del total de las 361 parcelas existentes, con Calidad II, 213 tienen un IH menor o igual a 70, lo que representa el 59% de las mismas. Por tanto, estas 213 parcelas fueron las que se emplearon para el ajuste de las ecuaciones que dieron origen a los diagramas de manejo de la densidad. En la Tabla 6.10 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de estas parcelas, y en la Tabla 6.11, a modo de comparación, los mismos estadísticos para las parcelas con IH mayor de 70. Donde N es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), H_0 la altura dominante (en m), \bar{d} el diámetro medio aritmético (en cm), t la edad (en años) e IH el índice de Hart-Becking (en porcentaje). En la Figura 6.8 se representa el diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas con Calidad II.

Tabla 6.10. Estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de las parcelas con Calidad II e IH menor o igual a 70.

Estadístico	N (pies/ha)	d_g (cm)	H_0 (m)	\bar{d} (cm)	t (años)	IH
Máximo	2.800,00	36,56	13,85	35,49	124,00	69,65
Mínimo	169,51	8,56	5,40	8,50	37,90	19,59
Media	743,31	19,06	9,55	18,02	58,50	48,13
Desviación estándar	491,82	4,80	1,63	4,48	12,21	12,68
Coef. de variación (%)	66	25	17	25	21	26

Tabla 6.11. Estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de las parcelas con Calidad II e IH mayor a 70.

Estadístico	N (pies/ha)	d_g (cm)	H_0 (m)	\bar{d} (cm)	t (años)	IH(%)
Máximo	700,00	39,69	12,66	38,62	82,70	550,23
Mínimo	18,83	7,64	4,00	7,64	25,00	70,66
Media	179,83	19,97	7,78	18,88	47,49	140,22
Desviación estándar	125,60	5,92	1,66	5,68	10,51	90,94
Coef. de variación (%)	70	30	21	30	22	65

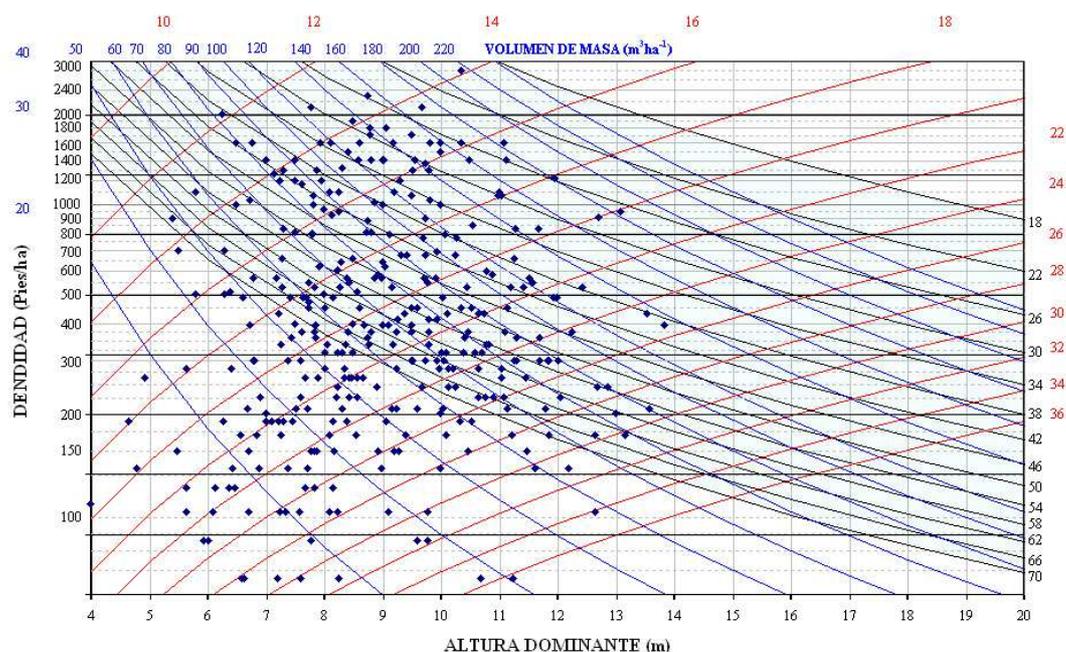


Figura 6.8. Diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas de Calidad II.

En la Figura 6.9 se presentan el diagrama de manejo de la densidad y, superpuesto sobre el mismo, el programa de claras propuesto como ejemplo para un rodal incluido en este grupo de calidad (en color verde). En la Tabla 6.12 se presentan los valores numéricos de las principales variables de masa antes y después de clara correspondientes al programa de claras propuesto, y que han sido obtenidos a partir de las ecuaciones que dieron origen al diagrama de manejo de la densidad.

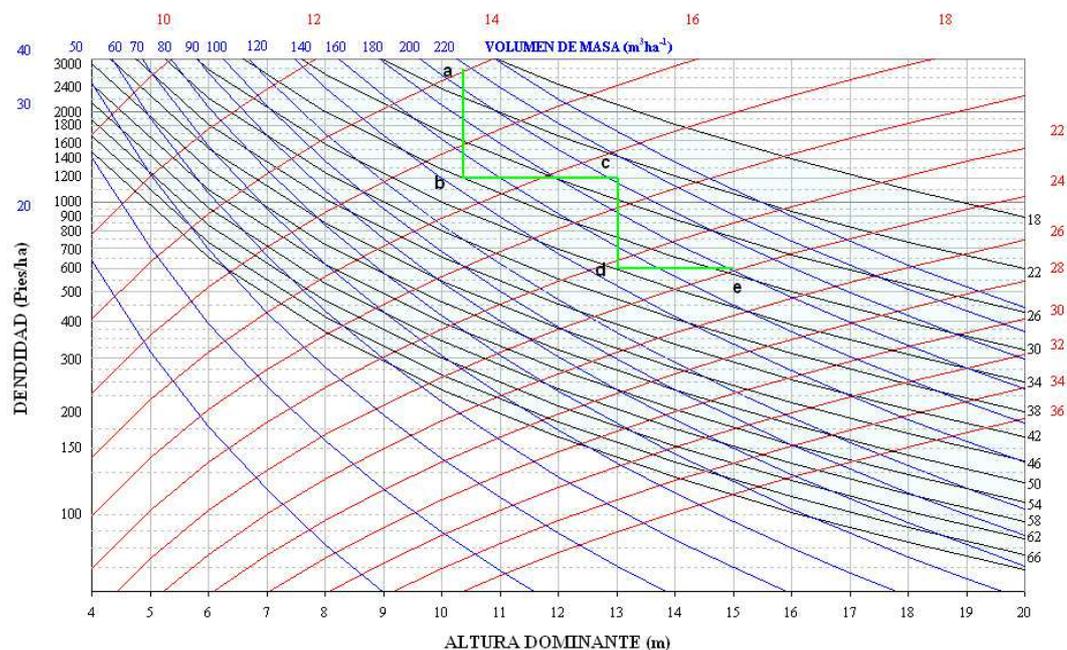


Figura 6.9. Diagrama de manejo de la densidad superpuesta con el programa de claras para una situación actual de Calidad II (en color verde).

Igual que en el ejemplo anterior, con el régimen selvícola propuesto en este ejemplo se pueden alcanzar crecimientos en altura dominante entre 2-3 metros para rotaciones entre las intervenciones de aproximadamente 20 años. En este caso, la meta final propuesta es de 15 metros en altura dominante, con valores del índice de Hart-Becking, también como en el ejemplo anterior, dentro de rangos admisibles.

Tabla 6.12. Valores de las principales variables de masa antes (AC) y después de clara (DC) para el programa de claras propuesto para una situación actual de Calidad II en la Figura 6.9.

Operación	H_0 (m)	N (pies ha ⁻¹)		d_g (cm)		V (m ³ ·ha ⁻¹)		G (m ² ·ha ⁻¹)		IH (%)		t (años)
		AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	
Clara (a-b)	10,37	2.800	1.200	13,9	17,0	196,20	127,38	42,67	27,29	19,6	29,9	48
Clara (c-d)	13	1.200	600	18,9	22,3	183,10	128,60	33,82	23,46	23,9	33,7	68
Corta final (e)	15	600	-	23,9	-	161,81	-	26,87	-	29,2	-	88

donde H_0 es la altura dominante (en m), N es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), V el volumen con corteza (en m³/ha), G el área basimétrica (en m²/ha), IH el índice de Hart-Becking (en porcentaje) y t la edad (en años). AC y DC indican los valores de las variables antes y después de la clara.

Las claras del esquema silvícola propuesto como ejemplo presentan un peso alto con extracciones en área basimétrica del 36,0%, en la primera, y 30,6% en la segunda intervención (valores muy similares si se refieren al volumen). Sirve también aquí lo comentado en el ejemplo 1, respecto a los pesos de las claras, aunque en este caso los valores de extracción en área basimétrica son aún más superiores a los recomendados, teniendo en cuenta que además se trata de una calidad algo inferior. El principal problema, como ya se ha comentado en el ejemplo anterior, es que se parte de unas elevadísimas densidades para la edad que presenta la parcela.

El índice de Hart-Becking varía después de las claras entre 29,9 y 33,7, y se encuentra en un caso prácticamente igual al ejemplo anterior, sirviendo por tanto lo ya comentado en el ejemplo 1.

Si se consideran las tablas de producción propuestas por Montero *et al.* (2001), este otro ejemplo se encontraría, como en el caso anterior, enmarcado entre la calidad 17 y 14 definidas por estos autores, pero a diferencia del ejemplo 1 más cerca de la 14. Igualmente se parte de densidades muy superiores a las iniciales de la tabla a la edad de 20 años y casi triplicando las previstas a los 50 años. También aquí se parte de una situación inicial que hace inviable la aplicación de intensidades de clara similares a las propuestas. La densidad prevista ahora a los 90 años es de 608 pies/ha, para la calidad 14, lo cual concuerda perfectamente con el ejemplo de esta tesis. Se puede observar también, como en el ejemplo anterior, que se encuentran algo por debajo los valores de d_g , G y V (24,7 cm, 29,1 m²/ha y 165,5 m³/ha, respectivamente).

Respecto a las tablas de producción propuestas por Franz y Forster (1980) el ejemplo se aproximaría a la calidad 16. La densidad prevista por estos autores a los 90 años es de 250 pies/ha, muy por debajo de lo previsto en el ejemplo. Al igual que en el ejemplo anterior, en este caso el valor de d_g (31,3 cm) se encuentra también bastante por encima del valor del ejemplo, pero no así los de G y V (19,2 m²/ha y 113 m³/ha, respectivamente) que se encuentran muy por debajo.

En cuanto a las tablas de producción propuestas por Castellani *et al.* (1980-82), comparando como en los casos anteriores, el ejemplo de esta tesis estaría encuadrado, como en el ejemplo anterior, entre la calidad III y la IV de estos autores, pero en este caso no se ajusta muy bien a ninguna de las dos.

En cuanto a las tablas de Couhert y Duplat (1993), este ejemplo no encaja muy bien en ninguna de las tres tablas establecidas por los autores, encontrándose entre medias de las realizadas para las calidades 12 y 8.

El modelo de Llobet (2008) para calidad II (con altura dominante a los 80 años de 14 m), y aprovechamiento de la madera para trituración, propone turnos de 40-45 años, con una densidad a esta edad de 1.000-1.500 pies/ha, lo cual no concuerda en absoluto con lo planteado en el ejemplo, que de hecho ya debería estar cortado en ese caso.

Ejemplo 3: Esquema selvícola para masas de la clase de calidad III, IS= 6

Del total de parcelas usadas en este trabajo, 531 presentan calidad de estación III. De ellas 183 tienen un *IH* menor o igual a 70, lo que representa el 34,5% de las mismas. Por tanto, este porcentaje de parcelas de calidad III fueron las utilizadas para ajustar el diagrama de manejo de la densidad. Puede observarse como a medida que disminuye la calidad de estación aumenta el número de parcelas con índices de Hart-Becking elevados, es decir, que cuanto menor es la calidad de estación mayor es el espaciamiento que presenta la masa. En la Tabla 6.13 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables de masa de estas parcelas. A modo de comparación, en la Tabla 6.14 se presentan esos mismos estadísticos para las variables de masa de las parcelas de calidad III e *IH* mayor de 70. Donde *N* es el número de pies por hectárea, *d_g* el diámetro medio cuadrático (en cm), *H₀* la altura dominante (en m), \bar{d} el diámetro medio aritmético (en cm), *t* la edad (en años) e *IH* el índice de Hart-Becking (en porcentaje). En la Figura 6.10 se representa el diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas con Calidad III.

Tabla 6.13. Estadísticos descriptivos de las principales variables de masas de las parcelas con Calidad III e *IH* menor o igual a 70.

Estadístico	<i>N</i> (pies/ha)	<i>d_g</i> (cm)	<i>H₀</i> (m)	\bar{d} (cm)	<i>t</i> (años)	<i>IH</i> (%)
Máximo	2.600,00	27,78	11,69	26,90	117,00	69,86
Mínimo	282,52	8,74	4,27	8,67	38,00	35,12
Media	849,01	16,85	7,30	16,04	67,42	55,01
Desviación estándar	422,67	3,78	1,37	3,61	15,48	8,65
Coef. de variación (%)	50	22	19	23	23	16

Tabla 6.14. Estadísticos descriptivos de los datos de las parcelas con Calidad III e *IH* mayor a 70.

Estadístico	<i>N</i> (pies/ha)	<i>d_g</i> (cm)	<i>H₀</i> (m)	\bar{d} (cm)	<i>t</i> (años)	<i>IH</i> (%)
Máximo	1.200,00	40,43	11,00	40,43	109,00	990,41
Mínimo	18,83	7,32	2,50	7,64	28,00	70,67
Media	250,94	16,95	5,77	16,17	57,82	190,33
Desviación estándar	203,86	5,39	1,44	5,16	15,93	164,07
Coef. de variación (%)	81	32	25	32	28	86

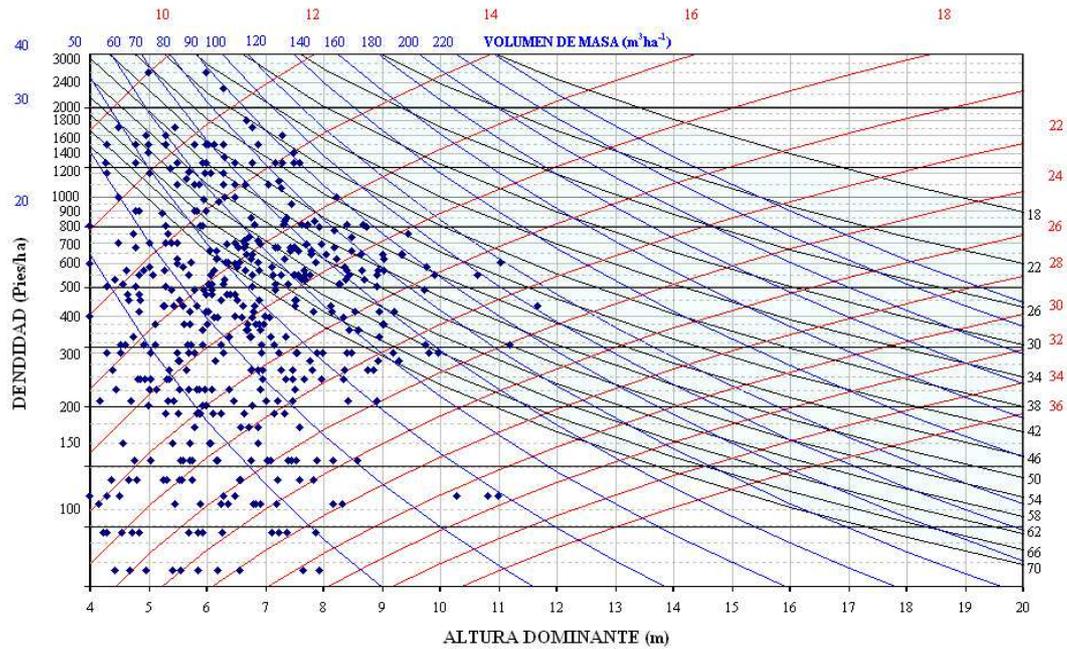


Figura 6.10. Diagrama de manejo de la densidad junto con la nube de puntos altura dominante-densidad de las parcelas de Calidad III.

En la Figura 6.11 se presentan el diagrama de manejo de la densidad y, superpuesto sobre el mismo, el programa de claras propuesto como ejemplo para un rodal incluido en este grupo de calidad (en color verde). En la Tabla 6.15 se presentan los valores numéricos de las principales variables de masa antes y después de clara correspondientes al programa de claras propuesto, y que han sido obtenidos a partir de las ecuaciones que dieron origen al diagrama de manejo de la densidad.

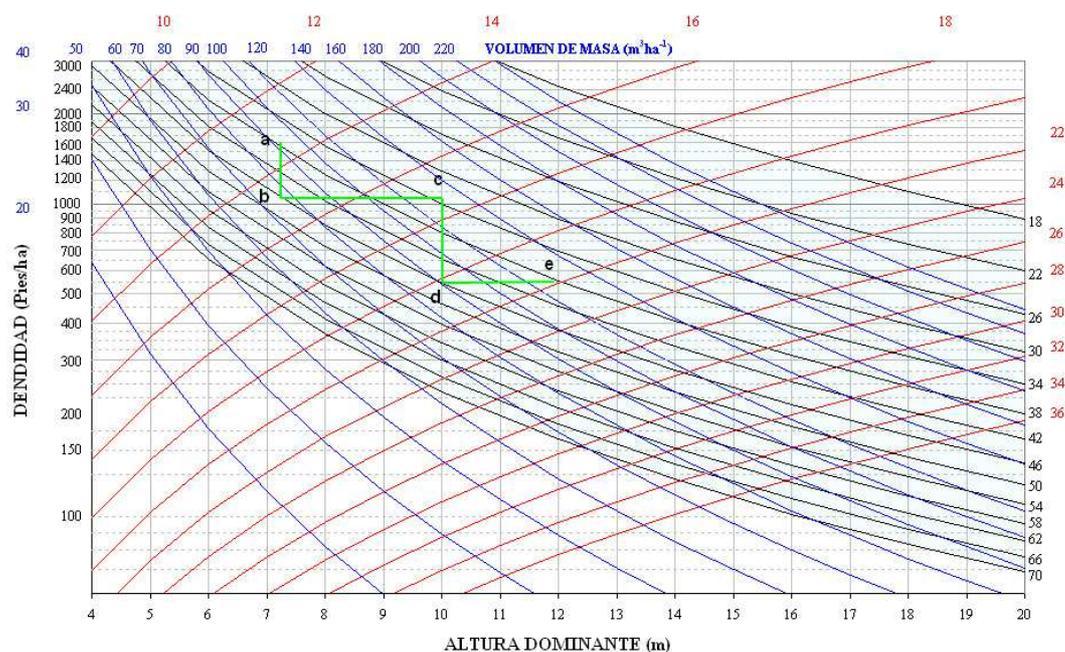


Figura 6.11. Diagrama de manejo de la densidad superpuesto con el programa de claras genérico para una situación actual de Calidad III (en color verde).

De forma parecida a los casos anteriores, con el régimen selvícola propuesto en este ejemplo se pueden alcanzar crecimientos en altura dominante entre 2-3 metros, pero en este caso son necesarias rotaciones entre las intervenciones superiores a los 20 años, y concretamente en este ejemplo entre, 26-28 años. Se ha marcado como meta final una altura dominante de 12 metros, lo que supone un turno de corta más largo, como es de prever para este ejemplo de calidad inferior.

Tabla 6.15. Valores de las principales variables de masa antes (AC) y después de clara (DC) para el programa de claras propuesto para una situación actual de Calidad III en la Figura 6.11.

Operación	H_0 (m)	N (pies ha ⁻¹)		d_g (cm)		V (m ³ ha ⁻¹)		G (m ² ha ⁻¹)		IH (%)		t (años)
		AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	
Clara (a-b)	7,3	1.600	1.050	13,5	14,9	83,96	67,74	22,77	18,23	36,8	45,4	54
Clara (c-d)	10	1.050	550	17,3	20,1	112,26	80,73	24,57	17,47	33,2	45,8	80
Corta final (e)	12	550	-	21,9	-	108,18	-	20,77	-	38,2	-	108

donde H_0 es la altura dominante (en m), N es el número de pies por hectárea, d_g el diámetro medio cuadrático (en cm), V el volumen con corteza (en m³/ha), G el área basimétrica (en m²/ha), IH el índice de Hart-Becking (en porcentaje) y t la edad (en años). AC y DC indican los valores de las variables antes y después de la clara.

El programa de claras propuesto presenta un peso medio, con unas extracciones en área basimétrica del 19,9%, en la primera, y del 28,9% en la segunda intervención. Aunque el valor del área basimétrica en la primera intervención concuerda mejor con lo recomendado por los diferentes autores, ya comentados, no ocurre lo mismo con la segunda intervención, donde el valor vuelve a ser muy alto, considerando además que se trata de la calidad más baja.

El índice de Hart-Becking varía entre 33,2 y 45,8, lo que coincide con lo comentado anteriormente para el valor del área basimétrica.

Observando las tablas de producción propuestas por Montero *et al.* (2001), este último ejemplo se encontraría algo por debajo de la calidad 11, para las edades intermedias, aunque a los 110 años se ajusta mucho mejor. Para esta edad la densidad prevista es de 650 pies/ha, un poco superior a la establecida en el ejemplo. A diferencia de los dos ejemplos anteriores, en este caso los valores de dg y V (21,4 cm y 115,6 m³/ha, respectivamente) son más cercanos, permaneciendo también más bajo el valor de G (23,4 m²/ha).

Respecto a las tablas de producción propuestas por Franz y Forster (1980), el ejemplo se encontraría entre las calidades 12 y 11. Las densidades previstas por estos autores a los 110 años son de 227 y 230 pies/ha, respectivamente, la mitad de lo propuesto en el ejemplo de esta tesis, como también ocurría en el primer caso. Al igual que en los casos anteriores, el valor de dg (32,1 y 30,6 cm, según calidades) se encuentra también bastante por encima del valor del ejemplo pero no así los de G y V (18,3 y 17,6 m²/ha, y 93 y 82 m³/ha, respectivamente, y según calidades), que se encuentran muy por debajo.

Considerando las tablas de producción propuestas por Castellani *et al.* (1980-82), y comparando como en los casos anteriores, el ejemplo de esta tesis se encontraría fuera de las tablas consideradas, por debajo incluso de la peor calidad, la IV de estos autores.

En cuanto a las tablas de Couhert y Duplat (1993), este ejemplo, como en el caso anterior, tampoco encaja muy bien en ninguna de las tres tablas establecidas por los autores.

El modelo de Llobet (2008) para calidad III (con altura dominante a los 80 años de 11 m) propone turnos de 150 años, ya que no hay aprovechamiento maderero, con una densidad a esta edad de 800 pies/ha, lo cual representa como una cuarta parte más de

lo previsto en el ejemplo. Se puede observar que también, como ocurría con las tablas anteriores, el ejemplo de esta tesis presenta una calidad inferior a las de las masas catalanas.

6.2.5. Conclusiones

Como conclusión a este subcapítulo puede ponerse de manifiesto la gran versatilidad y sencillez que presentan los diagramas de manejo de la densidad, pues permiten diseñar fácilmente programas de claras para la masa actualmente existente, según características de cada rodal y la concreción de objetivos o destino de la madera en el momento de la corta. Son especialmente interesantes si se cuenta además con curvas de calidad de estación, a partir de las cuales es posible conocer otros datos como la edad, la altura dominante o la calidad, según los datos de origen que en cada caso se disponga.

En las masas de este estudio existe una gran heterogeneidad de espesura, incluso dentro de una misma calidad, destacando el hecho de que hay gran número de parcelas con espesura defectiva. En estas parcelas de baja densidad no debe aplicarse un programa de claras, pero sin embargo resulta muy útil también el diagrama de manejo de densidad, ya que permite al gestor calcular fácilmente la producción en la corta final.

De forma general, para todos los ejemplos, se puede decir que estos programas de claras se pueden aplicar cuando se alcanza un umbral de espesura suficiente, $IH < 46$, en el que tienen sentido intervenciones de reducción de la densidad. Para los rodales con densidad deficiente no se considera necesario plantear un programa de claras, sino solamente una intervención de corta final. En esos casos el diagrama de manejo permite calcular las producciones que se van a obtener.

6.3. Modelo estático con desagregación por clases diamétricas

6.3.1. Introducción

Para la realización del modelo estático con desagregación por clases diamétricas se ha seguido una metodología similar a la empleada por otros autores (Burk y Burkhart, 1984; Cao *et al.*, 1982; Knoebel *et al.*, 1986; Kotze, 2003; Uribe, 1997). De esta manera puede obtenerse no sólo información dasométrica, como puede ser el volumen de masa, sino que el modelo se complementa con un módulo de desagregación que permite estimar la distribución diamétrica de la masa y realizar una clasificación de los productos según unas dimensiones de trozas especificadas (Diéguez-Aranda, 2004), obteniendo así información más detallada de la estructura de la masa y de la clasificación de los productos que proporciona según destinos comerciales.

6.3.2. Material y métodos

6.3.2.1. Datos empleados

Los datos utilizados son los descritos en cada uno de los Capítulos anteriores de esta tesis para el ajuste de las diferentes funciones y relaciones empleadas en el modelo, por lo que no se repite en este Capítulo todo lo relativo a ello y se remite a los anteriores.

6.3.2.2. Datos de entrada al modelo y funciones asociadas

6.3.2.2.1. Datos de entrada al modelo

En el modelo elaborado se parte de la situación de una masa en un instante determinado, definida por tres variables de estado: número de pies/ha (N), altura dominante (H_0) e índice de sitio (IS).

6.3.2.2.2. Curvas de calidad de estación

Las curvas de calidad de estación se han elaborado conforme a lo explicado en el Capítulo 5 de esta tesis.

Entre las once ecuaciones en diferencias algebraicas evaluadas para describir el patrón de crecimiento en altura, el modelo elegido para representar las calidades de estación de *Pinus halepensis* en la zona de estudio ha sido el CC9 Hossfeld (citado en Kiviste *et al.*, 2002). La expresión final de dicho modelo, incluyendo los valores de los parámetros obtenidos en el ajuste de regresión, es la siguiente:

$$H_2 = \frac{H_1 + 16,3229 + \sqrt{(H_1 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_1 \cdot t_1^{-1,3097}}}{2 + 8.185,244 \frac{t_2^{-1,3097}}{(H_1 - 16,3229 + \sqrt{(H_1 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_1 \cdot t_1^{-1,3097}})}} \quad (\text{ec.6.6})$$

siendo H_1 y H_2 las alturas dominantes (m) a las edades t_1 y t_2 , respectivamente.

Como ya se comentó en el capítulo 5, se puede estimar el índice de sitio (IS) asociado a la edad de referencia, conocida la altura dominante de la parcela (H_0) y su edad (t), sustituyendo en este caso en la ecuación referida (ec.6.6) H_2 por IS y t_2 por el valor de la edad de referencia, 60 años en este caso. La expresión resultante entonces es la siguiente:

$$IS = \frac{H_0 + 16,3229 + \sqrt{(H_0 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_0 \cdot t^{-1,3097}}}{2 + \frac{38,3872}{(H_0 - 16,3229 + \sqrt{(H_0 - 16,3229)^2 + 8.185,244 \cdot H_0 \cdot t^{-1,3097}})}} \quad (\text{ec.6.7})(\text{ec.6.8})$$

De forma similar, para conocer la altura dominante (H_0) a una edad determinada (t), dado un índice de sitio (IS) asociado a la edad de referencia, en este caso 60 años, como ya se ha comentado, bastaría con sustituir en la ecuación anterior t_1 por el valor de 60 y H_1 por IS , resultando entonces la siguiente expresión:

$$H_0 = \frac{IS + 16,3229 + \sqrt{(IS - 16,3229)^2 + 38,3872 \cdot IS}}{2 + 8.185,244 \frac{t^{-1,3097}}{(IS - 16,3229 + \sqrt{(IS - 16,3229)^2 + 38,3872 \cdot IS})}} \quad (\text{ec.6.8})$$

Además, conocido el índice de sitio (IS) es posible conocer, junto con la altura dominante (H_0), la edad de la masa.

6.3.2.2.3. Relación altura-diámetro generalizada

El ajuste de la relación altura-diámetro generalizada se ha realizado en el Capítulo 2 de esta tesis, donde se han descrito los datos utilizados y se han explicado la metodología empleada y los resultados obtenidos.

De los 30 ensayados, el modelo elegido para representar la relación altura-diámetro generalizada en el conjunto total de los montes estudiados ha sido el propuesto por Sloboda *et al.* (1993) Modificado, cuya expresión es:

$$h = 1,3 + (H_m - 1,3) \cdot e^{0,3532 \left(1 - \frac{d_g}{d}\right)} \cdot e^{0,0315 \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d}\right)} \quad (\text{ec.6.9})$$

siendo:

h : altura total (m).

d : diámetro normal (cm).

d_g : diámetro medio cuadrático (cm).

H_m : altura media de la masa (m).

6.3.2.2.4. Función de perfil y estimación del volumen de árbol

El ajuste de la función de perfil se ha realizado en el capítulo 4 de esta tesis, donde se han descrito los datos utilizados y se han explicado la metodología empleada y los resultados obtenidos.

Finalmente, el modelo seleccionado para representar la función de perfil, tanto para el conjunto total de los datos como para cada una de las zonas por separado, ha sido el modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995), cuya expresión para el conjunto total de datos es la siguiente:

$$r_i = \frac{a_1 \cdot d}{1 - e^{a_3 \cdot (1,3-h)}} + \left(\frac{d}{2} - a_1 \cdot d \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 - e^{a_2 \cdot (1,3-h)}} \right) + e^{-a_2 \cdot h_i} \cdot \left[\frac{\left(\frac{d}{2} - a_1 \cdot d \right) \cdot e^{1,3 \cdot a_2}}{1 - e^{a_2 \cdot (1,3-h)}} \right] - e^{a_3 \cdot h_i} \cdot \left(\frac{a_1 \cdot d \cdot e^{-a_3 \cdot h}}{1 - e^{a_3 \cdot (1,3-h)}} \right) \quad (\text{ec.6.10})$$

siendo:

r_i : radio con corteza correspondiente a la altura h_i (cm).

d_i : diámetro con corteza correspondiente a la altura h_i (cm).

d : diámetro normal con corteza (cm).

h_i : altura (m) desde la base del árbol hasta el punto donde se alcanza el diámetro d_i .

o h : altura total del árbol (m).

La tarifa de cubicación con clasificación de productos se ha obtenido a partir de la ecuación (ec.6.7), con los valores de los parámetros de la Tabla 6.16.

Como ya se comentó en el capítulo 4, el volumen se puede obtener integrando la ecuación (ec.6.10) alrededor del eje de alturas, de acuerdo con la expresión (ec.6.11):

$$F(h_i) = \int \pi \cdot r_i^2(h_i) \cdot dh \quad (\text{ec.6.11})$$

En este caso es necesario realizar la integral definida entre cero y el valor de H , ya que la función de Riemer *et al.* (1995) (ec.6.10) corta el eje de coordenadas, obteniéndose valores negativos de volumen si se realiza la integral indefinida. Así, la expresión que resulta para calcular el volumen total del árbol, integrando la expresión (ec.6.11) entre cero y H , es la ecuación (ec.6.12):

$$V = d^2 \cdot e^{-17,8167 \cdot H} \cdot \frac{(A - B + C + D + E + F + G + I + J)}{(1,07532 - e^{0,0559 \cdot h})^2 \cdot (12,3919 - e^{1,9362 \cdot h})^2} \quad (\text{ec.6.12})$$

donde las expresiones de A, B, C, D, E, F, G, I y J se muestran a continuación:

$A = 171,747 \cdot e^{19,7528 \cdot h}$	(ec.6.13)
$B = 6,48127 \cdot e^{21,689 \cdot h}$	(ec.6.14)
$C = 26,4515 \cdot e^{21,7449 \cdot h}$	(ec.6.15)
$D = e^{19,8646 \cdot h} \cdot (505,168 - 19,0471 \cdot h)$	(ec.6.16)
$E = e^{17,8725 \cdot h} \cdot (4.323,16 - 5,56932 \cdot h)$	(ec.6.17)
$F = e^{17,8167 \cdot h} \cdot (-1.131,23 + 0,0642955 \cdot h)$	(ec.6.18)
$G = e^{19,8087 \cdot h} \cdot (-676,921 + 0,439783 \cdot h)$	(ec.6.19)
$I = e^{21,8007 \cdot h} \cdot (-19,9697 + 0,752032 \cdot h)$	(ec.6.20)
$J = e^{17,9284 \cdot h} \cdot (-3.191,92 + 120,604 \cdot h)$	(ec.6.21)

Como también se comentó en el capítulo 4, se puede obtener el volumen del árbol (V) entre dos alturas h_1 y h_2 , para la clasificación de productos, a partir de la ecuación (ec.6.11) mediante la expresión $V=F(h_2) - F(h_1)$. Sin embargo, este método presenta el inconveniente de que la ecuación de Riemer *et al.* (1995) no tiene inversa generalizada, por lo que no puede estimarse directamente el volumen hasta un cierto diámetro en punta delgada. Resulta necesario, entonces, utilizar procedimientos iterativos de determinación de raíces para estimar la altura a la que se alcanza un determinado diámetro en punta delgada (Castedo y Álvarez, 2000; Novo *et al.*, 2003). A este respecto, Novo *et al.* (2003) han desarrollado un programa en lenguaje SAS que estima la altura a la que se alcanza un determinado diámetro mediante el método de estimación de raíces de la bisección, permitiendo así la construcción de una tabla de cubicación que da el volumen del árbol para diferentes combinaciones de diámetro normal, altura total y radio en punta delgada.

6.3.2.2.5. Distribuciones diamétricas

El análisis de las distribuciones diamétricas se ha realizado en el Capítulo 3 de esta tesis, donde se han descrito los datos utilizados y se han explicado la metodología empleada y los resultados obtenidos.

La distribución diamétrica de las parcelas se ha ajustado mediante la función de Weibull, y la obtención de los parámetros de dicha distribución se ha llevado a cabo mediante el método de los momentos.

El modelo de desagregación se ha desarrollado para proyectar la distribución diamétrica de la masa en un instante dado a partir de una serie de variables de la propia masa. La metodología utilizada considera las variables diámetro medio

cuadrático, altura dominante y número de pies de la masa a una edad determinada, y recupera los parámetros de la función de distribución o de densidad de Weibull mediante el método de los momentos.

La expresión de la función de densidad de Weibull es la siguiente:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}, \quad x \geq 0 \quad (\text{ec.6.22})$$

dónde:

x : es la variable aleatoria, en este caso el diámetro normal.

a : es un parámetro de situación que define el origen de la distribución, que en el caso de las distribuciones diamétricas coincide con el diámetro mínimo de la distribución.

b : es un parámetro de escala relacionado con el recorrido o rango de la distribución.

c : es un parámetro de forma.

e : es la base del logaritmo neperiano, tomando todos los parámetros valores positivos.

Para conocer el número de árboles de la masa hasta una determinada clase diamétrica de centro i y amplitud δ es necesario integrar la ecuación de Weibull (ec.6.22) desde 0 hasta el valor extremo superior de esa clase diamétrica (x), es decir $i + \delta/2$, obteniendo el número total de pies hasta dicha clase diamétrica multiplicando el resultado de la integral por el número total de pies de la masa. Su expresión matemática es la de la ecuación (ec.6.23):

$$F(x) = \int_0^x \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} dx = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \quad (\text{ec.6.23})$$

Una vez fijado el parámetro de localización a , y conocidas la media y la varianza de la distribución diamétrica, bien por los datos de un inventario específico o por las relaciones de la media con otras variables de masa, es posible obtener los parámetros b y c de la función Weibull por el método de los momentos, tal y como se ha explicado en el capítulo 3.

Dado que el objetivo es proyectar la distribución diamétrica de la masa en función de otras variables de masa más fáciles de medir, como por ejemplo el número de pies por hectárea, el área basimétrica, la altura dominante o el diámetro medio cuadrático, o que se puedan predecir para un momento dado mediante modelos de crecimiento, se ha optado por modelizar la variable diámetro medio (\bar{d} , momento de primer orden) en función de dichas variables, dado que se puede obtener la varianza (var, momento de segundo orden) en función de éste y del diámetro medio cuadrático mediante la siguiente relación:

$$\text{var} = d_g^2 - \bar{d}^2 \quad (\text{ec.6.24})$$

El modelo elegido para representar el diámetro medio, de entre cuatro ensayados, fue el siguiente:

$$\bar{d} = d_g - e^{0,0555 - 0,0008 \cdot N + 0,0465 \cdot H_0} \quad (\text{ec.6.25})$$

siendo:

\bar{d} : diámetro medio aritmético, en centímetros.

d_g : diámetro medio cuadrático, en centímetros

H_0 : altura dominante, en metros

N : número de pies por hectárea.

6.3.2.2.6. Diámetro medio cuadrático

Para la realización del diagrama de manejo de la densidad (en el subcapítulo 6.2) se ha ajustado una relación para el diámetro medio cuadrático que es la que se va a utilizar en este modelo. En el subcapítulo 6.2 se han descrito los datos utilizados y se han explicado la metodología empleada y los resultados obtenidos.

La relación obtenida ha sido la siguiente:

$$d_g = 29,96676 \cdot N^{-0,23628} \cdot H_0^{0,474291} \quad (\text{ec.6.26})$$

donde:

d_g : diámetro medio cuadrático, en centímetros.

H_0 : altura dominante, en metros.

N : número de pies por hectárea.

6.3.2.2.7. Relación altura media- altura dominante

Una vez conocidas las variables de masa en un instante dado se puede pretender determinar una evolución de las mismas para el establecimiento de un esquema de claras. En este caso las densidades futuras son conocidas porque son fijadas por el gestor, pero sin embargo se desconoce la altura media de la masa H_m en el futuro, necesaria para su utilización en la expresión de la relación altura-diámetro generalizada. Para ello se ha ajustado una relación lineal $H_m = f(H_0)$ que permite su estimación en función de la altura dominante.

Para su ajuste se han empleado los datos de las 925 parcelas del inventario, tal y como ha quedado explicado en los Capítulos 1, 2 y 5 de esta tesis.

En la Figura 6.12 se representa la nube de puntos de los pares de valores altura dominante-altura media empleados en el ajuste de esta relación.

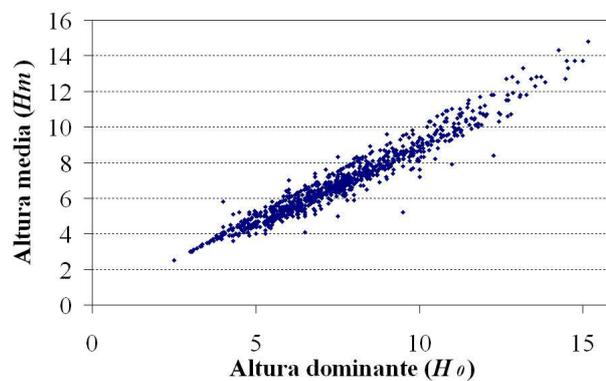


Figura 6.12. Representación gráfica de la altura media frente a la altura dominante.

En la ecuación (ec.6.27) se muestra el modelo que ha sido ensayado para obtener esta relación.

$$H_m = \beta_0 + \beta_1 \cdot H_0 \quad (\text{ec.6.27})$$

donde H_m es la altura media (en m), H_0 la altura dominante (en m), y β_0 y β_1 los parámetros a estimar en el ajuste de regresión. En la Tabla 6.16 se muestran los valores de los estadísticos de ajuste y en la 6.17 los valores de los parámetros obtenidos.

Tabla 6.16. Análisis de la varianza del modelo H_m .

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Prob>F	R^2_{Adj}
Modelo	1	3.633,5	3.633,5	15.317,0	<,0001	0,9432
Error	922	218,7	0,2372			
Total corregido	923	3.852,2				

Tabla 6.17. Valores de los parámetros del modelo H_m .

Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	T para H_0 Parámetro=0	Prob> T asintótico
β_0	0,3168	0,0549	5,77	<,0001
β_1	0,8691	0,0070	123,76	<,0001

Se ha representado gráficamente el valor real frente al predicho (Figura 6.13), y se puede apreciar que no existen tendencias anómalas que indiquen el incumplimiento de las hipótesis de partida del ajuste de regresión.

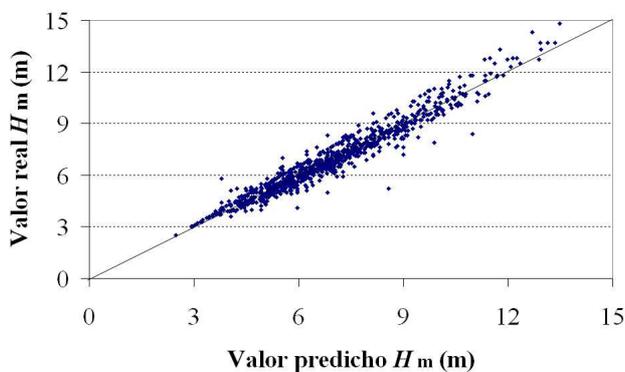


Figura 6.13. Representación del valor real frente al predicho de la altura media.

6.3.2.2.8. Relación número de pies- altura dominante

Como se ha comentado en el punto anterior, también es necesario disponer de alguna ecuación que permita conocer la densidad futura de la masa. Para ello se ha ajustado una relación $N = f(H_0)$, que permite su estimación en función de la altura dominante. Para evitar ajustar una ecuación por cada calidad de estación, en lugar de utilizar la edad de la masa como variable independiente se ha empleado su altura dominante.

Para el ajuste se han empleado, en principio, los datos de las 925 parcelas del inventario, tal y como ha quedado explicado en los Capítulos 1, 2 y 5 de esta tesis. En la Figura 6.14 se han representado las nubes de puntos de los pares de valores altura dominante-densidad y edad-densidad de estas parcelas. Puede apreciarse que no existe ninguna tendencia clara en la evolución de la densidad frente a la altura dominante ni frente a la edad, por lo que no puede ajustarse una ecuación fácilmente para el conjunto total de los datos.

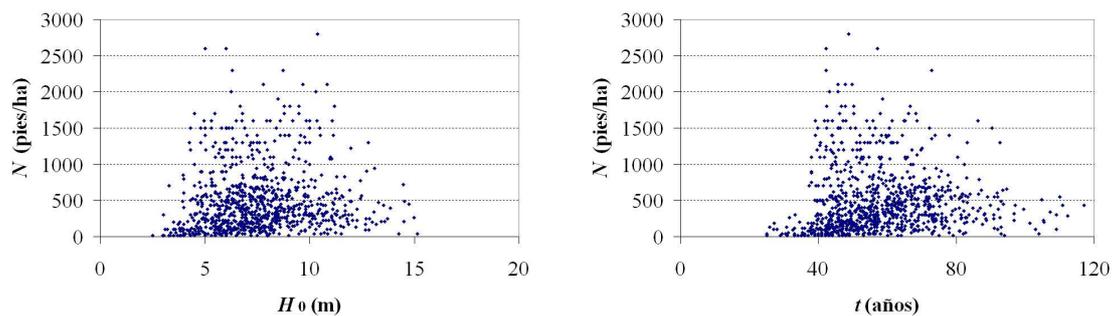


Figura 6.14. Representación gráfica de la densidad frente a la altura dominante y la edad de las 925 parcelas.

Las densidades de las parcelas son muy variables, y van desde 19 pies por hectárea hasta 2.800, incluso para la misma edad.

El ajuste de esta ecuación requiere que exista una cierta homogeneidad en los esquemas selvícolas efectuados en las parcelas que constituyen la muestra. De lo contrario se presentarán dificultades en la obtención de una ecuación que proporcione suficiente precisión en las estimaciones, y los resultados pueden carecer de valor práctico (Sánchez, 2001). Se hace necesario, entonces, discriminar la masa según la densidad, de tal forma que este ajuste sea factible.

Dado que para la realización del diagrama de densidad (en el subcapítulo anterior) se ha efectuado una discriminación de la masa basada en el índice de Hart-Becking (IH), se considera apropiado hacer lo mismo en este caso (ver Figura 6.15). Además, este índice es un indicador selvícola de la selvicultura pasada, es de fácil cálculo, de interpretación intuitiva y tiene un buen fundamento biológico.

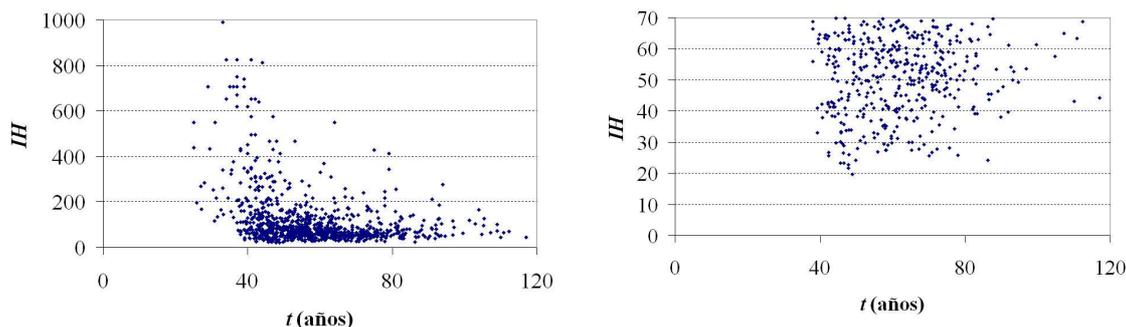


Figura 6.15. Representación gráfica del índice de Hart-Becking respecto de la edad del total de las parcelas (izquierda) y de las que tienen IH menor de 70 (derecha).

Así, se ha realizado el ajuste para aquellas parcelas que presentan un IH menor o igual a 70, discriminándolas además en tres grupos, con $20 < IH \leq 30$, $30 < IH \leq 50$ y con $50 < IH \leq 70$. En este sentido Erviti (1991) observó, en las masas que estudió, que tras la clara por lo bajo las estaciones con peores calidades tenían un índice de Hart (en malla cuadrada o marco real, y en %) mayor o igual que 35, y para las mejores estaba comprendido entre 20 y 35. También concluyó que los valores mínimos asintóticos inalcanzables por el índice de Hart para esta especie oscilan entre 14 y 36, estableciendo como límite inferior para el índice en esas masas el valor de 15.

Una vez agrupadas las parcelas se ha procedido a ajustar a cada grupo una ecuación que relacione la densidad únicamente con la altura dominante, puesto que aunque se cuenta con datos de edad de todas las parcelas, no es ésta una variable que se mida fácilmente en los inventarios. En la ecuación (ec.6.28) se muestra el modelo que ha sido ensayado para obtener esta relación.

$$\ln(N) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(H_0) \quad (\text{ec.6.28})$$

donde N es la densidad, H_0 la altura dominante y β_0 y β_1 los parámetros a estimar en el ajuste de regresión. En la Tabla 6.18 se muestran los valores de los estadísticos de ajuste y en la 6.19 los valores de los parámetros, para cada uno de los rangos de IH en los que se ha discriminado la masa.

Tabla 6.18. Análisis de la varianza del modelo $\ln(N)$.

Grupo	Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medios	F	Prob>F	R^2_{Adj}
20<IH≤30	Modelo	1	1,3100	1,3100	42,89	<,0001	0,5909
	Error	28	0,8551	0,0305			
	Total corregido	29	2,1651				

30<IH≤50	Modelo	1	22,3412	22,3412	327,26	<,0001	0,6793
	Error	153	10,4448	0,0683			
	Total corregido	154	32,7860				
50<IH≤70	Modelo	1	50,3506	50,3506	1473,55	<,0001	0,8624
	Error	234	7,9957	0,0342			
	Total corregido	235	58,3464				

Tabla 6.19. Valores de los parámetros del modelo Ln(N).

Grupo	Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	T para H ₀ Parámetro=0	Prob> T asintótico
20<IH≤30	β_0	11,1492	0,5890	18,93	<,0001
	β_1	-1,6433	0,2509	-6,55	<,0001
30<IH≤50	β_0	10,4547	0,2046	51,11	<,0001
	β_1	-1,6954	0,0937	-18,09	<,0001
50<IH≤70	β_0	10,1738	0,1037	98,08	<,0001
	β_1	-1,8897	0,0492	-38,39	<,0001

En las Figuras 6.16 a 6.18 se han representado, por un lado, los residuos del modelo frente al valor predicho del logaritmo neperiano de la densidad, y por otro el valor real frente al valor predicho, para cada grupo de parcelas establecido en función de IH. En estos gráficos se puede observar que el ajuste se ha hecho bajo condiciones de homogeneidad de varianza, y que no se aprecian tendencias anómalas que puedan indicar el incumplimiento de las hipótesis estructurales del análisis de regresión.

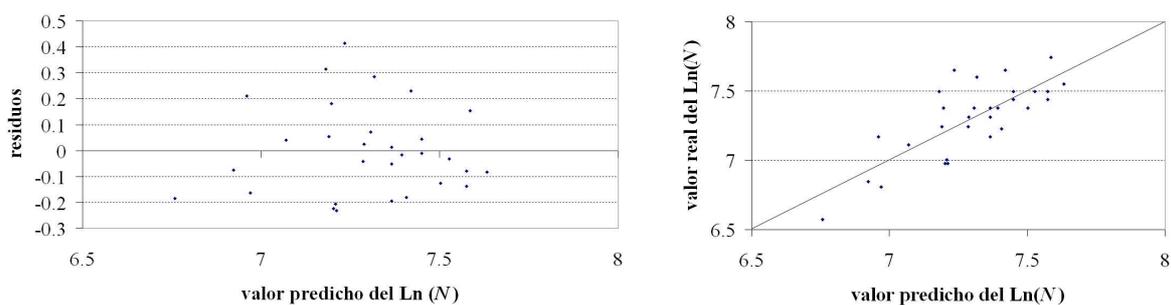


Figura 6.16. Representación gráfica de los residuos frente al valor predicho del logaritmo neperiano de la densidad (izquierda) y del valor real frente al predicho (derecha), para el ajuste del modelo en las parcelas con 20<IH≤30.

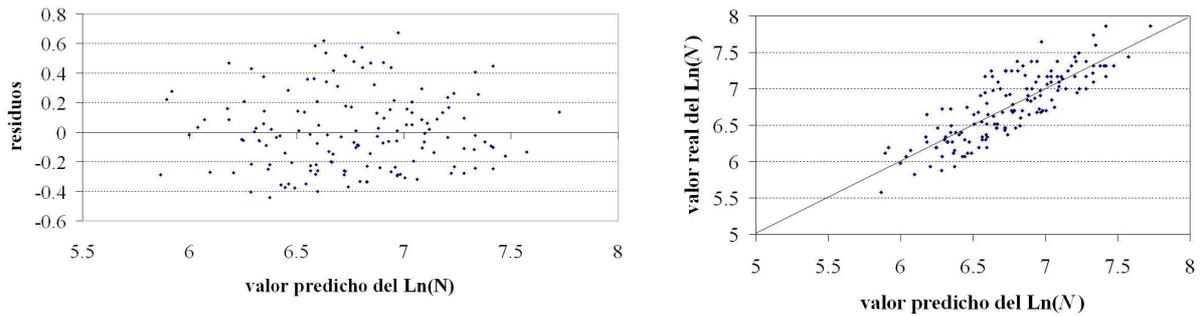


Figura 6.17. Representación gráfica de los residuos frente al valor predicho del logaritmo neperiano de la densidad (izquierda) y del valor real frente al predicho (derecha), para el ajuste del modelo en las parcelas con $30 < IH \leq 50$.

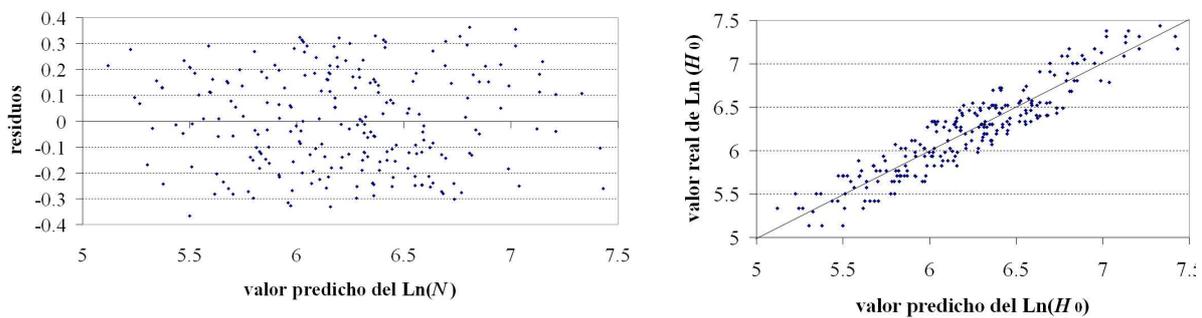


Figura 6.18. Representación gráfica de los residuos frente al valor predicho del logaritmo neperiano de la densidad (izquierda) y del valor real frente al predicho (derecha), para el ajuste del modelo en las parcelas con $50 < IH \leq 70$.

La aplicación práctica de los modelos elegidos requiere el empleo de las variables densidad y altura dominante en lugar de su logaritmo, por lo que se ha realizado una transformación exponencial. En este modelo en que la variable dependiente se ha transformado, se ha incorporado un factor corrector del sesgo (c), que en el caso frecuente de que la transformación sea logarítmica aparece como multiplicativo en la expresión del modelo y se calcula como:

$$c = \exp\left(\frac{REMC^2}{2}\right) \quad (\text{ec.6.29})$$

donde $REMC$ es la raíz del error medio cuadrático del modelo logarítmico ajustado. Esta corrección, debida a Meyer (1944), se puede obviar si el ajuste de la función es bueno.

Las expresiones definitivas del modelo para cada uno de los grupos de parcelas en los que se ha discriminado la masa se muestran en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Expresión del modelo $N = f(H_0)$ ajustado por grupos de parcelas.

Grupo	Expresión matemática del modelo	
$20 < IH \leq 30$	$N = 1,0153872 \cdot \exp(11,1492) \cdot H_0^{-1,6433}$	(ec.6.30)
$30 < IH \leq 50$	$N = 1,0347243 \cdot \exp(10,45467) \cdot H_0^{-1,69537}$	(ec.6.31)
$50 < IH \leq 70$	$N = 1,0172318 \cdot \exp(10,17384) \cdot H_0^{-1,88967}$	(ec.6.32)

6.3.2.3. Estructura del modelo estático con desagregación por clases diamétricas

De forma sintética, en el modelo de masa estático elaborado se parte de la situación de una masa en un instante determinado (t) definido por tres variables de estado: número de pies/ha (N), altura dominante (H_0) e índice de sitio (IS , aunque se podría prescindir de esta variable si no se desea conocer la edad de la masa), y se pretende llegar a estimar el volumen por hectárea, clasificado según destinos.

Una vez conocidas esas variables de estado en un instante determinado, y mediante las funciones correspondientes, es posible conocer la distribución diamétrica de la masa, es decir, determinar el número de pies en cada una de las clases diamétricas (n_{cd}), a partir de la estimación de los momentos de primer y segundo orden de la distribución (el diámetro medio \bar{d} y la varianza var , respectivamente).

Posteriormente, el empleo de una relación altura-diámetro generalizada (que estime la altura h_{cd} correspondiente al pie medio de cada una de las clases diamétricas desagregadas) y de una función de perfil (que utilice los valores de diámetro y altura obtenidos con las dos ecuaciones anteriores), hace posible conocer el volumen total de la masa clasificado por productos según unas dimensiones de trozas especificadas.

Para conocer el volumen total de la masa basta con multiplicar el volumen individual del árbol representativo de cada clase diamétrica ($V_{\text{árbolmedio.cd}}$) por su frecuencia (n_{cd}) según la función de distribución diamétrica, y sumar los valores obtenidos ($V_{\text{total}} = \sum V_{cd}$). Una vez que se dispone del valor de la producción total se puede también estimar el crecimiento medio o corriente de la masa, sin más que dividir el volumen total entre la edad, o la diferencia de volúmenes entre dos edades.

Si además se quieren conocer las estimaciones en el futuro, en el instante t_2 , estos valores permiten comparar diferentes alternativas selvícolas y elegir la más adecuada en función de los objetivos propuestos.

6.3.2.3.1. Esquema del modelo

En la Figura 6.19 se muestra la estructura del modelo estático con desagregación por clases diamétricas desarrollado, con las variables de entrada, las funciones de transformación y las variables de salida de cada uno de los módulos que lo componen. Se ha utilizado la nomenclatura empleada por Castedo (2004), Diéguez-Aranda (2004) y Diéguez-Aranda *et al.* (2005), con objeto de colaborar en el intento de estandarizar las salidas y las explicaciones de los modelos forestales de crecimiento desarrollados por la Unidad de Gestión Forestal Sostenible de la Universidad de Santiago de Compostela.

Así, las variables de entrada manual se han denotado por el símbolo . Los procesos que utilizan funciones matemáticas para transformar variables de entrada en variables intermedias o en variables de salida se han indicado mediante . Las variables resultado de cada módulo se han indicado mediante el símbolo . Estas variables de salida pueden ser a su vez variables de entrada en otros módulos, en cuyo caso se han denotado mediante el símbolo .

Además se ha empleado un código de colores para diferenciar las variables de entrada y las distintas relaciones (submodelos o módulos) utilizadas, que se han descrito en los apartados precedentes.

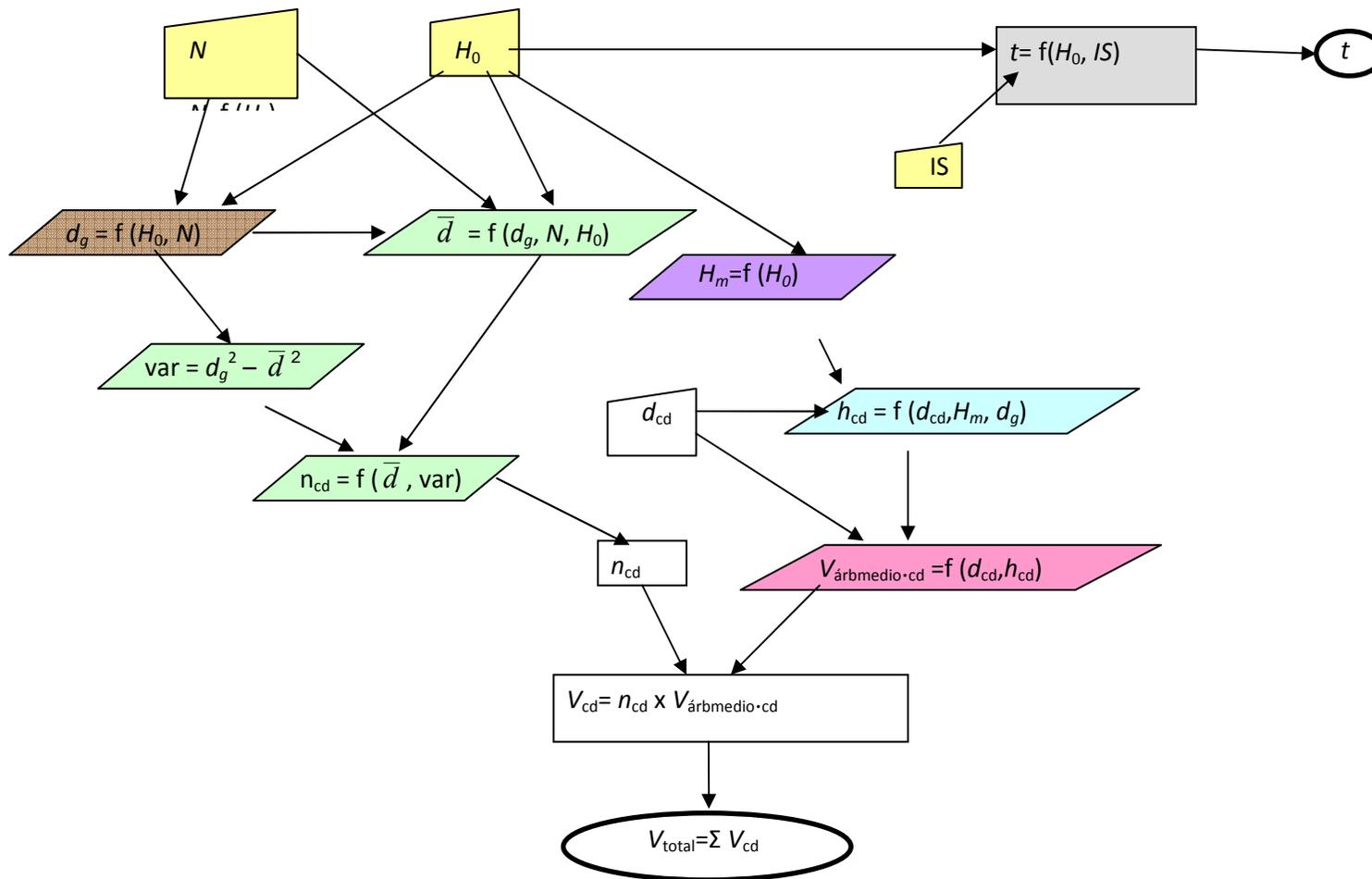


Figura 6.19. Esquema del modelo estático con desagregación por clases diamétricas

6.3.3. Ejemplo práctico de aplicación del modelo: evolución para un esquema de claras

Con la finalidad de ilustrar la utilización del modelo se muestra a continuación un ejemplo práctico de su aplicación para una parcela concreta de las existentes en el monte. Los datos de entrada en el modelo son: N (número de pies por hectárea), H_0 (altura dominante) e IS (índice de sitio). En este caso se trata de hacer un esquema de claras, por lo que se exponen los datos actuales de una parcela (Tabla 6.21) y los que se obtienen mediante el modelo, así como los referentes a la masa extraída y a lo que queda después de clara (Tabla 6.22).

Tabla 6.21. Datos de partida para una parcela concreta.

Datos de partida	Parcela ALC136
N (pies/ha)	1.300
H_0 (m)	12,8
IS	14 m (calidad I)

Los pasos que se han seguido para la obtención de los resultados mostrados en la Tabla 6.22 han sido los siguientes:

1. Cálculo de la edad, mediante la utilización de las curvas de calidad realizadas en el Capítulo 5, conocidos el índice de sitio IS y la H_0 .
2. Cálculo de la altura media (H_m), mediante la utilización de la relación $H_m=f(H_0)$ obtenida en el apartado 6.3.2.2.7 de este Capítulo.
3. Cálculo del diámetro medio cuadrático (d_g), antes y después de clara, mediante la utilización de la relación $d_g=f(N, H_0)$, con los valores mostrados en la ecuación ec.6.26. El valor de esta variable para la masa extraída (d_{ge}) se obtiene de la siguiente expresión matemática:

$$d_{ge}^2 = \frac{d_g^2 \cdot N - d_g p^2 \cdot Np}{N - Np}$$

donde:

d_g : diámetro medio cuadrático en la masa antes de la clara, en centímetros.

d_{ge} : diámetro medio cuadrático extraído de la masa, en centímetros.

N : número de pies por hectárea en la masa antes de la clara.

N_p : número de pies por hectárea en la masa después de la clara.

4. Cálculo del volumen de la siguiente manera:

- Cálculo del volumen unitario por clases diamétricas de 1 cm, utilizando la relación altura-diámetro generalizada, obtenida en el Capítulo 2 de esta tesis y cuya ecuación se muestra en ec.6.9 para obtener la altura de un pie medio de esa clase diamétrica, y la ecuación ec.6.12, obtenida en el Capítulo 4 de esta tesis y procedente de la función de perfil ajustada, para obtener dicho volumen unitario de un pie medio de la clase diamétrica correspondiente.
- Desagregación por clases diamétricas mediante el método de los momentos, tal y como queda explicado en el Capítulo 3 de esta tesis, para obtener el número de pies correspondientes a cada clase diamétrica, mediante la utilización de las ecuaciones ec.6.23 y ec.6.24.
- Cálculo del volumen por clase diamétrica, multiplicando el volumen unitario de cada clase por el número de pies que le corresponde, de acuerdo a la desagregación realizada anteriormente.
- Volumen total, obtenido mediante la suma del volumen correspondiente a todos los pies existentes antes de clara, los extraídos y, por diferencia de ambos, resulta el que queda después de clara.

Tabla 6.22. Valores de las principales variables de masa del programa de claras para la parcela ALC136.

VARIABLES DE ENTRADA		MASA PRINCIPAL ANTES DE CLARA				MASA EXTRAÍDA			MASA PRINCIPAL DESPUES DE CLARA		
H_0 (m)	N (pies/ha)	t (años)	Hm (m)	d_g (cm)	V (m ³ /ha)	N_e (pies/ha)	d_{ge} (cm)	V_e (m ³ /ha)	N_p (pies/ha)	d_{gp} (cm)	V_p (m ³ /ha)
12,8	1.300	47	11,44	18,45	192,13	500	14,15	49,53	800	20,69	142,61
15,0	800	70	13,35	22,31	198,67	350	17,25	59,39	450	25,56	139,28
17,0	450	92	15,09	27,12	185,59	175	20,79	47,18	275	30,47	138,41
19,0	275	120	16,82	32,12	177,26	275	32,12	177,26	---	---	---

En la Figura 6.20 se muestra la estructura del modelo estático con desagregación por clases diamétricas desarrollado, con las variables de entrada, las funciones de transformación y las variables de salida de cada uno de los módulos que lo componen, para la primera clara que se muestra en este ejemplo (Tabla 6.22).

6.3.4. Conclusiones

Como conclusión a este subcapítulo puede ponerse de manifiesto la utilidad de disponer de una herramienta como es un modelo estático de crecimiento con desagregación por clases diamétricas, que permite la obtención de unos datos más elaborados. El modelo admite la estimación de volúmenes con clasificación de productos e incluye las distribuciones diamétricas, consiguiéndose así que los datos obtenidos sean mucho más completos.

El uso práctico del modelo requiere de su programación en una hoja de cálculo o de la elaboración de un programa específico en alguno de los lenguajes de programación. Esto no ha sido uno de los objetivos concretos en el caso de realización de esta tesis.

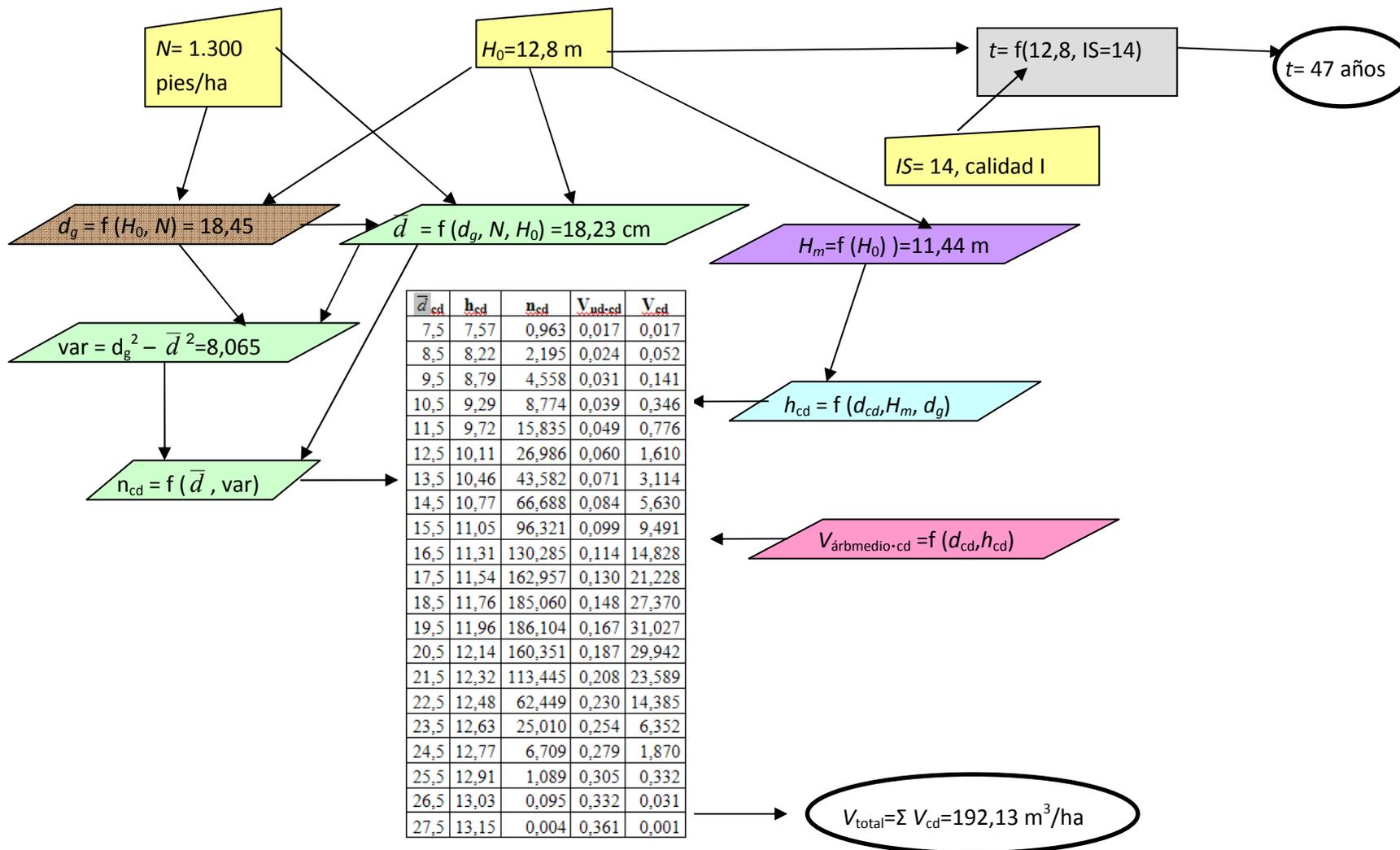


Figura 6.20. Esquema del modelo estático con desagregación por clases diamétricas para el ejemplo de la primera clara propuesta en la parcela ALC136

6.4. Bibliografía

- Abbas, H. (1986) La productivité des forêts de Pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyses écodendrométriques. Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, 127-156.
- Alejano, M.R., Martínez Montes, E. y Tíscar, A. (2000) Selvicultura en masas protectoras de pino carrasco en la cuenca del Guadiana menor (provincias de Granada y Jaén). Objetivos y criterios de gestión. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 10, 111-116.
- Álvarez González, J.G. (1999) Estudio de la densidad: Determinación de los valores máximo y mínimo. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 14 pp. (Documento interno).
- Ando, T. (1968) Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stands. Tokyo: Bulletin N° 210. Government Forest Experiment Station.
- Archibald, D.J. y Bowling, C. (1995) Jack pine density management diagram for boreal Ontario. OMNR, Northeast and Northwest Science and Technology. TN-005 (NWST TN-31). 20 pp.
- Barrio, M. (2003) Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, p. 252.
- Barrio, M. y Álvarez, J.G. (2005) Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stand and its use in designing schedules. *Forestry* 78(3), 209-216.
- Barrio, M., Balboa, M.A., Castedo, F., Diéguez, U., Álvarez, J.G. (2006). An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 223, 24-34.
- Bedel, J. (1986) Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, 109-119.
- Bruce, D., y Wensel, L.C. (1988) Modelling forest growth: approaches, definitions and problems. In: Ek, A.R., Shifley, S.R., Burke, T.E., (eds.), *Forest Growth Modelling and Prediction Conference*, USDA For. Ser. Gen. Tech. Rep. NC-120, p. 1-8.
- Burk, T.E., y Burkhart, H.E. (1984) Diameter distributions and yields of natural stands of loblolly pine. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI and SU. Publication No. FSW-1-84.

- Cameron, I. (1988) An evaluation of the density management diagram for coastal Douglasfir. B.C. Min. of For. Lands, Res. Branch. 17 pp. Canadá.
- Cao, Q.V., Burkhart, H.E., y Lemin, R.C. (1982) Diameter distributions and yields of thinned loblolly pine plantations. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI and SU. Publication No.FSW-1-82.
- Castedo , F. (2004) Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* Don. en Galicia. Simulación de alternativas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis doctoral, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela.
- Castedo, F., y Álvarez, J.G. (2000) Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 9 (2), 253-268.
- Castellani, C., Ghidini, G. y Tosi, V. (1980/82) Volume and yield tables for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in Italy. Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura 8, 3-44.
- Chakroun, M.L. (1986) Le pin d'Alep en Tunisie. Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, 25-27.
- Chauchard, L.M. (2001) Crecimiento y producción de repoblaciones de *Pinus radiata* D. Don en territorio histórico de Guipúzcoa (País Vasco). Departamento de Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco. Tesis doctorales N° 40.
- Ciancio, O. (1986) Sylviculture du Pin d'Alep. Options Méditerranéennes. Serie Etudes C.I.H.E.A.M 86/I, 47-54.
- Couhert, B. y Duplat, P. (1993) Aleppo pine (*Pinus halepensis*) in the Provence-Alpes-Cote d'Azur region: proposals for silviculture and a yield model. Bulletin Technique Office National des Forets 25, 3-22.
- Davis, K.P. (1966) Forest management: regulation and valuation. New York: McGraw-Hill.
- Dean, J.T. y Baldwin, V.C. (1993) Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. USDA Forest Service. Southern Forest Experimental Station. Res. Pap., SO 275. 7 pp.
- Dean, J.T. y Jokela, E.J. (1992). A density-management diagram for slash pine plantations in the lower coastal plain. Southern Journal of Applied Forestry, 16, 178-185.
- Diéguez-Aranda, U. (2004) Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

- Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G., Barrio, M., y Rojo Alboreca, A. (2005) Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (north-western Spain). *Annales Forest Science*, 62, 1-10.
- Drew, T.J. y Flewelling, J.W. (1979) Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. *Forest Science*, 25, 518-532.
- Duplat, P. (1996). Sylviculture du chêne pédonculé. En: Bulletin technique N° 31. Office National des Forêts. Pp.:15-19.
- Erviti, J.J. (1991) Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica, Madrid. p. 319.
- Fernández, J.G. y Madrigal, A. 1977 Plan dasocrático del monte "Las Morericas" de *Pinus halepensis*. Letur. Albacete. Comunicación personal.
- Flewelling, J.W., Wiley, K.N., Drew, T.J. (1980) Stand density management in western hemlock. Weyerhaeuser Corporation. Western Forestry Research Centre, Centralia, WA. Forestry Research Technical Report 042-1417/80/32
- Franz, F. y Forster, H. (1980) Table de production de pin d'Alep pour les Aurès - Algeria. Chaire de la Production Forestière de l'Université de Munich. Forschungsvonhaben in Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit, Bonn.
- García, J.A.B. (2005) Línea de mortalidad natural para *Quercus pyrenaica* Willd. en el Parque Natural de Montesinho. Relatório Final de Estágio do Curso de Ingeniería de Montes. Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.
- García, O. (1988) Growth modelling- a (re)view. *New Zealand Journal of Forestry*, 33(3), 14-17.
- García, O. (1993) Stand growth models: Theory and practice. In. Advancement in Forest Inventory and Forest Management Sciences. Proceedings of the IUFRO Seoul Conference, Forestry Research Institute of the Republic of Korea, p. 22-45.
- García, O. (1994) The state-space approach in growth modelling. *Canadian Journal Forest Research*, 24, 1894-1903.
- González, J.M. (2000) Primeras experiencias de claras selectivas mixtas en *Pinus halepensis* Mill. *Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales*, 10, 103-109.
- González, A. y Cabezas, J.D. (2000) Actuaciones selvícolas sobre masas de pino carrasco procedente de repoblación con objeto de aumentar su diversidad biológica: planificación y gestión a medio plazo en montes públicos de los tt.mm. de Lorca y Caravaca - región de Murcia. *Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales*, 10, 117-126.

- Goulding, C.J. (1972) Simulation technique for a stochastic model of Douglas-fir. Ph. D. Thesis. University of British Columbia, Vancouver.
- Herrero, J. (2005) Realización de diagramas de manejo de densidad (SDMD) para *Quercus pyrenaica* Will. en el Sistema Central. Trabajo de investigación para obtener Diploma de Estudios Avanzados. Universidad de Valladolid.
- Kenk, G.K. (1980) Werteichenproduktion und ihre Verbesserung in Baden-Württemberg. Allgem. Forstzeitschr., 39, 428-429.
- Kiviste, A.K., Álvarez, J.G., Rojo, A. y Ruiz, A.D. (2002) Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografía INIA: Forestal nº 4. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, 190.
- Klepac, D. (1986) Le pin d'Alep en Dalmatie. Options Méditerranéennes, Serie Etudes CIHEAM 86/I, 29-42.
- Knoebel, B.R., Burkhart, H.E., y Beck, D.E. (1986) A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar. Forest Science, Monograph 27, 62.
- Korzukhin, M.D., Ter-Mikaelian, M.T., y Wagner, R.G. (1996) Process versus empirical models: wich approach for forest ecosystem management? Canadian Journal Forest Research, 26, 879-887.
- Kotze, H. (2003) A strategy for growth and yield research in pine and eucalipt plantations in Komatiland Forest in South Africa. In: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), Modelling Forest Systems. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK, pp.75-84.
- LLobet, S. (2008) Propuesta de modelo silvícola para montes de pino carrasco (*Pinus halepensis*) Simposio de silvicultura mediterránea en montes privados. Diputación Provincial de Barcelona. Colección de documentos de Trabajo, Serie Territorio nº5, pp.109-144.
- Long, J.N. (1985) A practical approach to density management. Forest Chron., 23, 23-26.
- Long, J.N., McCarter, J.B., y Jack, S.B. (1988) A lodgepole pine density management diagram for coastal Douglas-fir. Western Journal of Applied Forestry, 3(3), 88-89.
- McCarter, J.B. y Long, J.N. (1986) A lodgepole pine density management diagram. Western Journal of Applied Forestry, 1, 6-11.
- Meyer, H.A. (1944) A correction for systematic error occurring in the application of the logarithmic volume equation. Pennsylvania State University, Forest Research Paper 7.
- Montero, G., Cañellas, I. y Ruiz-Peinado, R. (2001) Growth and Yield Models for *Pinus halepensis* Mill. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales, 10 (1), 180-201.

- Moscovich, F.A. (2004) Modelos de crecimiento y producción forestal, p. 42. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Montecarlo, Montecarlo.
- Newton, P.F. (1997) Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand level management planning. *Forest Ecology and Management*, 98, 251-265.
- Newton, P.F. y Weetman, G.F. (1993) Stand density management diagrams and their development and utility in black spruce management. *Forestry Chronicle*, 69:421-430.
- Novo, N., Rojo, A., y Álvarez, J.G. (2003) Funciones de perfil del tronco y tarifas de cubicación con clasificación de productos para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. *Inv. Agr.: Sist. Recur. For.*, 12 (1), 123-136.
- Reineke, L.H. (1933) Perfecting a stand density index for even-aged forest. *Journal of Agricultural Research*, 46, 627-638.
- Riemer, T., Gadow, K.v., y Sloboda, V.B. (1995) Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. *Allg. Forst-und J.- Ztg.*, 166 (7), 144-147.
- Röhle, H. (1992) Ertragstafel für die Aleppokiefer (*Pinus halepensis*) in Israel. *Lehrstuhl für Waldwachstum-kunde der Universität München*, 65 pp.
- Sánchez Rodríguez, F. (2001) Estudio de la calidad de estación, crecimiento, producción y selvicultura de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 356 pp.
- Sanquetta, C.R. (1996) Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal. 59 p, Curitiba: Universidade Federal do Paraná/FUPEF. Série Didáctica N° 8, 59p.
- SAS Institute Inc. (2001). SAS/STAT™ User's Guide. Release 8.2. Cary, N.C. USA.
- Serrada, R. (1992) Selvicultura de las coníferas. Curso sobre selvicultura y ordenación de los bosques mediterráneos. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de producción vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de Lleida (inédito).
- Sloboda, V.B., Gaffrey, D., y Matsumura, N. (1993) Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände. *Allg. Forst. Jagdztg.*, 164, 225-228.
- Takadi, Y. (1963) The pre-estimating of stem yield based on the competition density effect. Tokyo: Bulletin No. 154. Government Forest Experiment Station.
- Uribe, A. (1997) Modelización del crecimiento de *Pinus patula* Schlect et Cham en la region Andina suroccidental colombiana. In: Ortega, A., Gezan, S. (eds.), *Proceedings of the IUFRO Conference on Modelling Growth of Fast-Grown Tree Species*. Valdivia (Chile). pp. 36-51.

- Valbuena, P. (2005) Diagramas para el manejo de la densidad de rodales de pino pudio (*Pinus nigra* Arn.) en la Península Ibérica. Trabajo de investigación para obtener Diploma de Estudios Avanzados.. Universidad de Valladolid
- Valbuena, P., del Peso, C. y Bravo, F. (2008) Stand density management diagrams for two mediterranean pine species in Easter Spain Investigación Agraria: Sistemas y Recursos forestales 17(2), 97-104.
- Valero, J. (2000) El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en Cataluña: estado de la especie en el territorio catalán, propuestas selvícolas en los planes técnicos de gestión y mejora forestal y usos industriales. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 10, 97-102.
- Vanclay, J.K. (1994) Modeling forest growth and yield - applications to mixed tropical forest, p. 312. CAB International, Wallingford, UK.
- Vignerón, C. (1988) La sylviculture du pin d'Alep a Barbentane. Foresterrané 87, FM., t. X, nº 1, p.103.
- Yoda, K., Kira, H., Ogawa, H. y Hozumi, K. (1963) Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. Journal Biology. Osaka City University, 14, 107-129.
- Zeide, B. (2004) Optimal stand density: a solution. Canadian Journal of Forest Research, 34, 846-854.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Una vez conseguidos todos los objetivos planteados en la realización de esta tesis sólo resta destacar algunas de las conclusiones obtenidas, tanto como resultado de los análisis realizados como del propio proceso de observación, pensamiento y razonamiento que conlleva la elaboración de un estudio de este tipo.

Así, es preciso destacar las siguientes conclusiones, no necesariamente escritas en orden de importancia, que permiten hacerse una idea del tipo de masas que se han estudiado, de las herramientas obtenidas y del futuro que debe plantearse para las mismas:

1.- A pesar de su aparente aspecto de masas muy densas, los datos muestran que un 56% de las parcelas presenta índices de Hart-Becking por encima de 70, cifra ésta ya bastante elevada. Los valores del índice de Hart-Becking (*IH*) oscilan entre el 19 y el 990%, presentando un valor medio de 117%, muy elevado y que corrobora la defectiva cobertura en gran parte de la masa. Esto concuerda también con lo manifestado en otro trabajo (Erviti, 1991), en el que se indica que las masas de *Pinus halepensis* poco densas representan el 97%, de las existentes en España.

2.- Los análisis se han realizado tanto para el conjunto total de datos de forma combinada como para cada una de las zonas por separado (denominadas, para abreviar, Alcubierre y Zuera), dado que como objetivo secundario se planteaba la necesidad de analizar si era posible aplicar modelos únicos para las dos zonas estudiadas. Esto se justificaba en las diferencias encontradas entre ambas zonas en algunas de las variables investigadas en anteriores trabajos realizados. Entre ellas no sólo se incluían las habituales variables de carácter dasométrico y selvícola, sino también una serie de parámetros referentes a caracteres morfológicos y adaptativos que contribuyen al conocimiento de la variación genética existente. Entre las primeras se encontraron diferencias significativas en la altura total, el perímetro, el crecimiento en los últimos 10 y 5 años, la edad y la fracción de cabida cubierta, y entre las segundas en la altura y dimensiones de copa, la rectitud y el ángulo de inclinación del fuste, la dominancia apical y el grosor y tipo de bifurcación de las ramas. Además, se encontraron diferencias en caracteres sanitarios como el grado de defoliación y el índice de afección por muérdago. El diferente régimen de incendios que presentan ambas zonas, jugando éstos un papel muy destacado en la zona de Zuera y condicionando así su gestión, indicaban a priori diferencias entre las masas. También sus diferencias fisiográficas (sobre todo orientaciones y pendientes), geológicas,

edáficas e incluso climáticas parecían indicar lo mismo. Sin embargo, a pesar de ello, no se han encontrado diferencias significativas en las ecuaciones obtenidas para modelizar la relación altura-diámetro generalizada, el diámetro medio y la función de perfil del tronco, que indicaran la necesidad de utilizar diferentes ecuaciones o valores de los parámetros para cada una de esas zonas.

3.- Se ha obtenido un conjunto de ecuaciones que relacionan diferentes variables, tanto de árbol como de parcela, como herramientas útiles y necesarias para su aplicación directa en la gestión selvícola.

Así, el modelo de Sloboda *et al.* (1993) Mod. ha resultado el más adecuado para representar la relación altura-diámetro generalizada, comprobándose así que una buena predicción de la altura de los árboles empleando estos modelos, requiere además del diámetro normal, una altura de masa y una variable que tenga en cuenta implícita o explícitamente la densidad de la masa (el diámetro medio cuadrático en este caso). No se tiene conocimiento de que el modelo escogido haya sido utilizado por otros autores para predecir la altura de otras especies, mucho menos para *Pinus halepensis*, especie para la que no se han obtenido hasta el momento relaciones de este tipo.

La función de Weibull permite modelizar correctamente las distribuciones diamétricas de la especie en la zona de estudio, como ha quedado demostrado con el test de Kolmogorov-Smirnov que solo excluyó el 5% de las parcelas a un nivel de significación del 20%, y que demuestra también la validez de la metodología utilizada (recuperación de los parámetros de la función de Weibull por el método de los momentos).

Se ha seleccionado el modelo exponencial de Riemer *et al.* (1995), como la función más indicada para definir el perfil del tronco y construir una tarifa de cubicación con clasificación de productos. Sin embargo, el inconveniente de esta ecuación es que no tiene inversa generalizada, por lo que no puede estimarse directamente el volumen hasta un cierto diámetro en punta delgada. Resulta necesario, entonces, utilizar procedimientos iterativos de determinación de raíces para estimar la altura a la que se alcanza un determinado diámetro en punta delgada.

4.- La elaboración de una sistema de calidad de estación para la masa y su comparación con otras curvas de calidad existentes para la especie, ha permitido observar que todas ellas representan calidades superiores a las encontradas en el área de este estudio.

El modelo elegido para representar la calidad ha sido el de Hossfeld IV, cit. en Kiviste *et al.*, (2002). Se han establecido tres calidades, correspondientes a 6, 10 y 14 metros de

altura dominante a los 60 años, suficientes para clasificar la zona de estudio, dada su baja productividad.

5.- Se han obtenido dos herramientas de apoyo para la gestión y selvicultura de las masas: un diagrama de manejo de la densidad, basado en el índice de Hart-Becking, de uso sencillo y que permite estimaciones rápidas incluso en monte, y un modelo estático de crecimiento, para obtener datos más elaborados. Estos modelos aúnan las diferentes relaciones entre variables obtenidas en esta tesis integrándolas en un único modelo, lo que hace más fácil su utilización, aunque todas ellas tienen una aplicación directa en la gestión forestal de forma independiente.

El diagrama de manejo de la densidad permite el diseño de forma sencilla de regímenes selvícolas. Con él se puede plantear de manera relativamente rápida el peso de las claras y las rotaciones de las mismas, así como su número, en función del objetivo final de corta que se establezca. Éste puede ser caracterizado bien por un diámetro medio cuadrático, una altura dominante, el número de pies por hectárea, el volumen a obtener o el índice de Hart-Becking.

El modelo estático con desagregación por clases diamétricas permite obtener no sólo información dasométrica, como puede ser el volumen de masa, sino que al complementarlo con el módulo de desagregación, permite estimar la distribución diamétrica de la masa y realizar una clasificación de los productos según las dimensiones de trozas que se quieran especificar. Se obtiene así una información más detallada de la estructura de la masa y de la clasificación de los productos que puede proporcionar, rentabilizando el aprovechamiento al máximo según los destinos comerciales existentes o preferentes en cada momento. Sin embargo, presenta el inconveniente de que requiere de su implementación o programación en una hoja de cálculo o programa informático, para obtener los resultados.

6.- El futuro inmediato para estas masas debe pasar por la utilización de las herramientas selvícolas anteriormente descritas en un documento de planificación forestal que permita revalorizar los recursos maderables y leñosos, para que junto con el resto de aprovechamientos no maderables del monte, así como con los valores más sociales e intangibles del mismo, sea posible atender simultáneamente los objetivos de persistencia y conservación de la masa forestal con el de instalación de actividades empresariales de extracción y transformación de estos recursos, de forma sostenible y continuada en el tiempo, como ya ocurrió en tiempos pasados.

Lo que traducido o más concretamente sería necesario:

1º realizar los necesarios Proyectos de Ordenación

2º ejecutar lo planificado en los mencionados Proyectos de Ordenación

3º hacer el seguimiento y evaluación de dicha ejecución, en primer lugar de los Planes Anuales de Aprovechamientos y posteriormente de las Revisiones de Ordenación que se consideren necesarias, bien por incumplimiento de lo planificado, bien por cambios ecológicos, climáticos, económicos, sociales, etc., que aconsejen un cambio también en el Proyecto

4º.- Análisis de mercado y de la estructura empresarial de extracción y transformación de todos los recursos tangibles e intangibles de los montes que permitan su persistencia en el tiempo, a ser posible con balance económico positivo y continuado.



*Consejo de
Protección de
la Naturaleza
de Aragón*



**GOBIERNO
DE ARAGON**

Departamento de Desarrollo Rural
y Sostenibilidad